



**Joana Sequeira dos Ramos Silva**

Mestre em Arquitectura Paisagista

## **Análise Computacional da Evolução da Hidromorfologia do Baixo Mondego em Resultado da Subida do Nível do Mar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão da Água

Orientador: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona  
Rodrigues, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente (Arguente): Prof. Doutor Pedro Manuel da Hora Santos Coelho  
Vogais: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues  
Prof. Doutor Paulo Alexandre Marques Diogo



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Abril 2015**





# **Análise Computacional da Evolução da Hidromorfologia do Baixo Mondego em Resultado da Subida do Nível do Mar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão da Água

Orientador: Prof. Doutor António Pedro de Nobre Carmona Rodrigues,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

**Joana Sequeira dos Ramos Silva**  
Mestre em Arquitectura Paisagista

**Abril 2015**



## **Análise Computacional da Evolução da Hidromorfologia do Baixo Mondego em Resultado da Subida do Nível do Mar**

Copyright Joana Sequeira dos Ramos Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL).

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Manifesto a minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Doutor António Carmona Rodrigues, por aceitar orientar a minha dissertação, e pela valiosa ajuda, partilha de informação, disponibilidade e preocupação.

Um sincero reconhecimento à Professora Marília Pires pelo auxílio na programação em linguagem Fortran, e aos Professores Šárka Nečasová e Tomáš Bodnár pela oportunidade de expor o meu trabalho numa conferência internacional.

Quero igualmente agradecer às minhas colegas e amigas de mestrado Andreia e Sara, pela companhia durante os últimos anos e por me terem ajudado sempre que precisei.

Um obrigado às minhas amigas Xana, Carolina, Joana e Diana pelo encorajamento que possibilitou a finalização deste trabalho.

Por último, agradeço em especial ao meu pai, à minha mãe e à minha irmã por, mais uma vez, demonstrarem o seu constante apoio e incentivo para que eu possa chegar sempre mais longe.





## Resumo

O êxito na previsão das consequências da subida do nível do mar à escala global está dependente de uma correcta análise de todos fenómenos que daí poderão resultar. Neste âmbito, o presente estudo incide sobre o efeito da subida do nível do mar na hidromorfologia de rios, parâmetro que não é com frequência um dado de entrada nas simulações numéricas em estudos e projectos de Hidráulica Fluvial.

Desenvolveu-se um modelo computacional na linguagem de programação Fortran (FTN 95), que permite simular a longo prazo a evolução do fundo móvel e da superfície livre de um rio. É um modelo de dinâmica sedimentar, unidimensional, que simula escoamentos em regime quase-permanente e em canais de topografia simples, utilizando a fórmula de Engelund-Hansen para o transporte sólido.

O modelo foi aplicado no trecho mais a jusante do Mondego, desde Coimbra até à foz no Atlântico, onde o rio flui na zona do chamado Baixo Mondego, planície aluvial, alvo de grandes alterações antropogénicas, nomeadamente obras de regularização fluvial. As que foram realizadas no séc. XVIII modificaram o original percurso do rio atribuindo-lhe uma topografia simples, mas não resolveram o seu principal problema, o excesso de assoreamento a jusante de Coimbra, tendo como consequência frequentes inundações e cheias. Estas obras colocaram em evidência a grande vulnerabilidade do rio aos problemas de transporte sólido e assoreamento. Mais tarde, em finais do séc. XX, as obras realizadas na sequência do Plano de Aproveitamento do Baixo Mondego vieram, de uma forma integrada, contribuir para o seu equilíbrio hidromorfológico. Actualmente, face à subida do nível do mar volta a colocar-se a questão do assoreamento a jusante de Coimbra. Logo, é importante conhecer as previsões a longo prazo de dinâmica sedimentar deste troço, para a sua adequada gestão.

Foram realizadas previsões para 20 cenários num horizonte temporal de 100 anos, todos eles consideram o caudal dominante calculado para o rio e variam de acordo com a subida do nível do mar, o caudal sólido e diâmetro médio dos sedimentos. Os resultados obtidos foram os previstos qualitativamente, isto é, a subida do nível do mar poderá alterar o leito aluvionar, elevando as cotas de fundo e aumentando os volumes de assoreamento.

**Palavras-chave:** subida do nível do mar; assoreamento; leitos aluvionares; modelação computacional de transporte sólido; Baixo Mondego.



## Abstract

The successful prediction of the consequences of sea level rise on a global scale depends on a proper analysis of all the phenomena it may lead to. In this context, the present study focuses on the effect of sea level rise in the rivers hydromorphology, a parameter which is not often an input for numerical simulations in studies and projects of river hydraulics.

A computational model to simulate the long-term evolution of mobile beds and free surface of a river was developed using the programming language Fortran (FTN 95). It is an one-dimensional sediment dynamics model that simulates *quasi*-steady flow regimes for channels with simple topography using the Engelund-Hansen formula for sediment transport.

The model was applied to the downstream section of the Mondego's river, from Coimbra to the river's mouth in the Atlantic, through the region called Baixo Mondego, an alluvial plain that has undergone several anthropogenic changes, including river regulation works. Those that were carried out in the XVIII century changed the original route of the river giving it a simple topography, but not solving its main problem, the excess of sedimentation downstream of Coimbra resulting in floods and overflows.

These works have highlighted the extreme vulnerability of the river to sediment transport and sedimentation problems. Later, at the end of the century XX, the works carried out following the *Plano de Aproveitamento do Baixo Mondego* came in an integrated way and contributed to a hydromorphological balance. Currently, in the face of sea level rising the problem of sedimentation downstream of Coimbra raised again. Therefore, it is important to know the forecast long-term sediment dynamics of this section, for its proper management.

Forecasts were made for 20 scenarios and a temporal horizon of 100 years; they all consider the dominant flow calculated for the river and vary according to sea level rising, sediment transport and medium grain size. The results showed that sea level rise will make changes on the river's mobile bed, elevating river bed levels and further increasing the sedimentation volume.

**Keywords:** sea level rise; sedimentation; erosion; alluvial rivers; computational modeling of sediment transport; Baixo Mondego.



## Índice de Matérias

<b>Agradecimentos.....</b>	<b>III</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Matérias.....</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>II</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviatura.....</b>	<b>XVII</b>
<b>Capítulo I – Introdução.....</b>	<b>2</b>
1.1 Considerações gerais .....	2
1.2 Objectivos .....	5
1.3 Estrutura da tese.....	5
<b>Capítulo II – Revisão da literatura .....</b>	<b>7</b>
2.1 Rio Mondego.....	7
2.1.1 Características gerais .....	7
2.1.2 O estuário do rio Mondego .....	10
2.1.3 Troço a modelar – Baixo Mondego.....	11
2.1.3.1 Descrição geral .....	11
2.1.3.2 Síntese histórica – Obras de regularização fluvial no Baixo Mondego.....	11
2.2 Hidromorfologia.....	16
2.2.1 Transporte sólido – origens e mecanismos .....	16
2.2.2 Dimensão das partículas .....	17
2.2.3 Condições críticas.....	20
2.2.4 Caudal dominante.....	21
2.2.5 Equações de transporte sólido .....	22
2.2.6 Tempo de reacção morfológica .....	24
2.3 Subida do nível do mar.....	26
2.4 Modelos numéricos de escoamentos em leitos móveis .....	30
2.4.1 Considerações gerais .....	30
2.4.2 Modelos matemáticos e numéricos de diferenças finitas utilizados .....	32

<b>Capítulo III – Metodologia e Dados .....</b>	<b>37</b>
3.1 Breve descrição de alguns modelos de transporte sólido .....	37
3.2 Justificação e descrição do modelo desenvolvido .....	40
3.3 Dados de entrada – <i>Input</i> .....	43
3.3.1 Dados geométricos .....	43
3.3.2 Dados hidráulicos: caudais líquidos, sólidos e alturas de água.....	45
3.3.3 Material sólido de fundo .....	46
3.3.4 Subida do nível do mar .....	47
<b>Capítulo IV – Aplicação do modelo e Análise de resultados.....</b>	<b>49</b>
4.1 Calibração do modelo .....	49
4.1.1 Dados de entrada – <i>Input</i> dos testes de calibração.....	49
4.1.2 Testes de calibração .....	50
4.2 Simulações no trecho .....	57
4.2.1 Dados de saída – <i>Output</i> .....	58
4.2.1.1 Cenários com SLR = 4 mm/ano.....	59
4.2.1.2 Cenários com SLR = 6 mm/ano.....	62
4.2.1.3 Cenários com SLR = 8 mm/ano.....	65
4.2.1.4 Cenários com SLR = 10 mm/ano.....	68
4.2.1.5 Cenários com SLR = 12 mm/ano.....	71
4.2.2 Cotas de fundo (ZB).....	74
4.2.3 Volumes de assoreamento .....	77
4.2.4 Superfície livre (WL) e Alturas de água (H) .....	82
<b>Capítulo V – Conclusões e Perspectivas futuras .....</b>	<b>87</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>91</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>97</b>
Anexo I .....	97
Anexo II .....	99
Anexo III.....	107

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.1</b> Dimensões espaciais de modelos de escoamento com superfície livre (Martin & McCutcheon, 1999; Carmo, 2004).....	2
<b>Figura 2.1</b> Localização e delimitação da bacia hidrográfica do rio Mondego. Adaptado de (Hidroprojecto, 1986).....	7
<b>Figura 2.2</b> Perfil longitudinal do rio Mondego da nascente à foz, com localização de algumas das obras hidráulicas presentes no sistema (Hidroprojecto, 1986) .....	9
<b>Figura 2.3</b> Perfil longitudinal do rio Mondego e três dos seus principais afluentes – rio Ceira, Alva e Dão (Soares, 1995).....	9
<b>Figura 2.4</b> Estuário do rio Mondego. Adaptado de (Duarte, Vieira, Neto, & Pardal, 2008).....	10
<b>Figura 2.5</b> Regularização do Baixo Mondego: perfil longitudinal do leito central (Lencastre & Franco, 2010).....	13
<b>Figura 2.6</b> Regularização do Baixo Mondego: perfis transversais tipo (Hidroprojecto, 1986).....	14
<b>Figura 2.7</b> (à esquerda) Vista aérea, mostrando ao fundo a planície aluvionar completamente inundada e, em primeiro plano, a povoação de Ereira já convertida em ilha; (à direita) Panorama da ruptura no dique direito do Canal Principal (Baixo Mondego), junto a Santo Varão (fotos de A. Carriço, 2001/01/30) (Carmo, 2004).....	15
<b>Figura 2.8</b> Diminuição exponencial do diâmetro médio dos sedimentos ao longo do perfil longitudinal do rio (Tanguy, 2010) .....	18
<b>Figura 2.9</b> Velocidades críticas (em cm/s), segundo HJULSTRÖM. Adaptado de (Waugh, 2009; Lencastre & Franco, 2010) .....	20
<b>Figura 2.10</b> Diagramas de Shields (Lencastre & Franco, 2010).....	21
<b>Figura 2.11</b> Representação do tempo de reacção morfológica segundo Prins e de Vries (Prins & de Vries, 1971).....	24
<b>Figura 2.12</b> Tempo de reacção morfológica com assoreamento do rio. Adaptado de (Prins & de Vries, 1971).....	25
<b>Figura 2.13</b> SLR no passado e no futuro (IPCC, 2013). .....	26
<b>Figura 2.14</b> Relação entre o aquecimento global e a subida do nível do mar (Rahmstorf, 2007). .....	27
<b>Figura 2.15</b> Previsão de SLR para o cenário RCP6.0 (tabela 2.3) com divisão das contribuições (IPCC, 2013) .....	27
<b>Figura 2.16</b> Roda virtual da relação entre os processos físicos, matemáticos, numéricos e computacionais. Adaptado de (Tanguy, 2010). .....	30

<b>Figura 2.17</b> Malha de diferenças finitas. Adaptado de (Carmo, 2004).	35
<b>Figura 3.1</b> Exemplo da interface gráfica disponibilizada por uma versão recente do <i>software</i> HEC-RAS (HEC-RAS 4.1) (US Army Corps of Engineers, 2014).	38
<b>Figura 3.2</b> Secção transversal tipo (Rodrigues A. C., 1986).	41
<b>Figura 3.3</b> Exemplo de dimensionamento.	42
<b>Figura 3.4</b> Perfil longitudinal inicial com alturas de água.	43
<b>Figura 3.5</b> Secções transversais do troço em estudo; J = 12 e J = 109 secções com dados disponibilizados (Baixo Mondego), J = 108 secção com dados estimados (braço Norte); (em cima à esquerda) secções transversais projectadas pela Hidroprojecto (Hidroprojecto, 1986).	45
<b>Figura 4.1</b> 1º Teste de calibração. Regime uniforme.....	51
<b>Figura 4.2</b> 2º Teste de calibração. Caudal sólido = 0 m <sup>3</sup> /s..	52
<b>Figura 4.3</b> 3º Teste de calibração. Caudal sólido = 2 x capacidade de transporte sólido .....	54
<b>Figura 4.4</b> 4º Teste de calibração. SLR = 8 mm/ano.....	56
<b>Figura 4.5</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 1..	59
<b>Figura 4.6</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 2 .....	60
<b>Figura 4.7</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 3 .....	60
<b>Figura 4.8</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 4 .....	61
<b>Figura 4.9</b> Comparação de assoreamentos, SLR = 4 mm/ano.....	62
<b>Figura 4.10</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 5 ...	62
<b>Figura 4.11</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 6. ..	63
<b>Figura 4.12</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 7 ...	64
<b>Figura 4.13</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 8 ...	64
<b>Figura 4.14</b> Comparação de assoreamentos, SLR = 6 mm/ano.....	65
<b>Figura 4.15</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 9 ...	66
<b>Figura 4.16</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 10.	66
<b>Figura 4.17</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 11 .	67
<b>Figura 4.18</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 12 .	67
<b>Figura 4.19</b> Comparação de assoreamentos, SLR = 8 mm/ano.....	68
<b>Figura 4.20</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 13 .	69
<b>Figura 4.21</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 14.	69
<b>Figura 4.22</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 15 .	70



<b>Figura 4.23</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 16 .	70
<b>Figura 4.24</b> Comparação de assoreamentos, SLR = 10 mm/ano.....	71
<b>Figura 4.25</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 17 .	71
<b>Figura 4.26</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 18.	72
<b>Figura 4.27</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 19 .	73
<b>Figura 4.28</b> Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 20 .	73
<b>Figura 4.29</b> Comparação de assoreamentos, SLR = 12 mm/ano.....	74
<b>Figura 4.30</b> Volumes de assoreamento para simulações de 100 anos .....	78
<b>Figura 4.31</b> Volumes de assoreamento para simulações de 10 anos .....	78
<b>Figura 4.32</b> Taxas anuais de assoreamento para os 20 cenários de acordo com as simulações para 100 anos. Valores obtidos através da expressão 4.1.....	79
<b>Figura 4.33</b> Taxas anuais de assoreamento para os 20 cenários de acordo com as simulações para 10 anos. Valores obtidos através da expressão 4.1.....	79
<b>Figura 4.34</b> Volumes de ultrapassagem da cota da margem obtidos nas simulações para 100 anos, calculados através da expressão 4.3.....	86



## Índice de Tabelas

<b>Tabela 2.1</b> Classificação de partículas sólidas através da sua dimensão pela Escala de Atterberg. Adaptado de (Haldar, 2013).....	19
<b>Tabela 2.2</b> Tempos de reacção morfológica, $N_{50}$ . Adaptado de (Rodrigues A. C., 2010).....	25
<b>Tabela 2.3</b> SLR até 2100, cenários projectados pelo IPCC no 5º Relatório. Adaptado de (RealClimate, 2013). ....	28
<b>Tabela 3.1</b> Dados de entrada geométricos considerados no modelo .....	43
<b>Tabela 3.2</b> Delimitação e características longitudinais do trecho em estudo.....	44
<b>Tabela 3.3</b> Delimitação e características longitudinais do Troço 2 .....	44
<b>Tabela 4.1</b> Dados das secções .....	50
<b>Tabela 4.2</b> Dados de entrada que distinguem os 20 cenários simulados e valor atribuído ao caudal líquido (caudal dominante), agrupados por subida do nível do mar. ....	58
<b>Tabela 4.3</b> Volume de erosão e assoreamento em cada cenário (100 anos).....	82



## Lista de Siglas e Abreviaturas

**HEC** – *Hydrological Engineering Center*

**IPCC** – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

**LECZ** – *Low Elevation Coastal Zone*

**PNSE** – Parque Nacional da Serra da Estrela

**SLR** – *Sea Level Rise*

**Q** – Caudal Líquido

**S** – Caudal Sólido

**MG** – *Medium Grainsize*

**ZB (ou HR)** – Cota de Fundo

**ZB0** – Cota de Fundo Inicial

**ZB1** – Cota de Fundo Final

**HA** – Cota da Margem

**WR** – Largura do Fundo

**WA** – Largura da Margem

**WL** – Superfície Livre

**H** – Altura de Água

**I** – Declive do Fundo

**i** – Perda de Carga

**Asr** – Assoreamento



# Capítulo I – Introdução

## 1.1 Considerações gerais

Razões de carácter económico têm levado a um progressivo desinvestimento das instituições com tradições e competências na modelação física, em detrimento da modelação numérica. Desde o início dos anos 90 que este comportamento se tem vindo a acentuar em estreita consonância com o crescente desenvolvimento dos métodos numéricos e com o ritmo exponencial da evolução da indústria informática (*hardware* e *software*).

Na aplicação de modelos numéricos a sistemas fluviais, a abordagem baseia-se nas leis gerais de conservação da Hidráulica, tais como: a) quantidade de movimento; b) energia; c) massa líquida e sólida. Estas determinam que nenhuma propriedade intrínseca do escoamento se perde ou ganha, mas antes se conserva.

Ao longo da história a Hidráulica evoluiu por três vertentes. Primeiro, no século XVII caracterizou-se pela experimentação pura (para obter formulações empíricas); posteriormente nos séculos XVIII e XIX, caracterizou-se pela teorização pura; e, mais tarde, no século XX e na actualidade, desenvolveu-se a Hidráulica Computacional.

Por conseguinte, hoje em dia, a resolução de um problema de Hidráulica Fluvial exige um conhecimento profundo de três diferentes áreas: (1) formulação matemática: equações que representam os princípios físicos; (2) implementação de técnicas numéricas: para possibilitar a resolução das equações; (3) implementação de uma estrutura computacional: criação de um *software*, para resolver as equações discretizadas numericamente. Os pontos (1), (2) e (3) constituem a sequência normal de operações que se utiliza na resolução de um problema de Hidráulica Fluvial recorrendo a um computador, isto é, são as fases de elaboração de um modelo de análise computacional, sendo obrigatória a interactividade entre as três (Carmo, 2004).

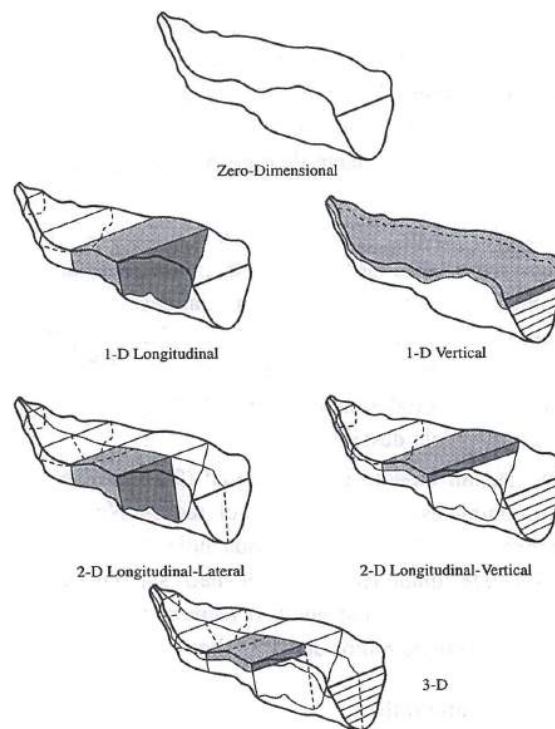
Os modelos numéricos para domínios fluviais podem ser classificados de acordo com: (i) os processos que descrevem; (ii) o tipo de escoamento considerado; (iii) as dimensões do domínio e o grau de estratificação do meio.

Relativamente aos processos que descrevem (i) existem: modelos de hidrodinâmica, modelos de dinâmica sedimentar (hidrodinâmica + dinâmica sedimentar) e modelos de qualidade da água (hidrodinâmica + parâmetros de qualidade da água).

Para prever a evolução da morfologia local é preciso conhecer a fundo as interações entre o escoamento do fluido (fase líquida) e o escoamento dos sedimentos (fase sólida), sendo que a hidromorfologia é um processo muito complexo de interação entre o meio líquido e o meio sólido. A erosão, transporte e deposição de sedimentos são fenômenos que ocorrem nos leitos dos rios, nos fundos dos estuários e zonas costeiras, evoluindo de acordo com a hidrodinâmica.

Continuando na classificação dos modelos numéricos para domínios fluviais, quanto ao tipo de escoamento considerado (ii), os modelos podem ser de zero dimensões, unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais. Trata-se de uma classificação geométrica e diz respeito ao número de dimensões segundo as quais o escoamento é relevante.

Em relação aos modelos numéricos para domínios fluviais categorizados de acordo com as dimensões do domínio e o grau de estratificação do meio (iii), podemos ter modelos: 1 DH (1-D Longitudinal) e 1 DV (1-D Vertical); 2 DH (2-D Longitudinal Lateral) e 2 DV (2-D Longitudinal Vertical); e, ainda, 2.5 DH, quase-3D e 3D (3-D) nos quais o escoamento é descrito nas três direcções, sendo que, 2.5 DH e quase-3D assumem como única simplificação a hipótese da pressão hidrostática (figura 1.1).



**Figura 1.1** Dimensões espaciais de modelos de escoamento com superfície livre (Martin & McCutcheon, 1999; Carmo, 2004).

“O sistema de equações do modelo hidrodinâmico é constituído por uma equação de conservação da massa líquida e por uma, duas ou três equações de conservação da



quantidade de movimento, consoante se trate de um modelo 1DH, 2DH, ou quase-3D” (Carmo, 2004).

Os modelos encontrados com maior frequência no domínio fluvial são os hidrodinâmicos 1DH. Para simulações realizadas em estuários é frequente que se exijam modelos hidrodinâmicos 2DH e 2D ou até, 2.5DH e quase-3D para estudar, por exemplo, o comportamento da cunha salina, os estuários significativamente mais largos que fundos, e ainda os efeitos da penetração e propagação da onda de maré em estuários.

Para a simulação do transporte sólido e evolução do fundo móvel, geralmente são utilizados modelos hidrodinâmicos complementados com um sistema de equações fechado composto por uma equação de continuidade da massa sólida e por uma ou mais equações dinâmicas para o cálculo de caudais sólidos. Em alternativa a este sistema de equações fechado podem recorrer-se a equações empíricas do tipo Manning-Strickler ou Engelund-Hansen, a modelos de turbulência de zero equações do tipo Prandtl, ou ainda a modelos de turbulência de uma ou de duas equações para o cálculo da viscosidade turbulenta.

O presente estudo incide sobre o efeito da subida do nível do mar (SLR – *Sea Level Rise*) nas dinâmicas fluviais, nomeadamente na hidromorfologia, um parâmetro que nos dias de hoje não é ainda com frequência um dado de entrada nas simulações de dinâmica sedimentar fluvial.

Contudo, esta situação deveria ser invertida, uma vez que há sinais de que as mudanças climáticas estão a acontecer e que não se tratam apenas de vagas ameaças para o futuro, não devendo por isso ser ignoradas. De facto, apesar de haver alguma incerteza relativamente ao rumo e magnitude das alterações, há poucas dúvidas de que fenómenos como a subida do nível médio das águas do mar são inevitáveis (Oliver-Smith, 2009).

As avaliações mais recentes apontam, no geral, para uma subida média do nível do mar de cerca de 1 m nos próximos 100 anos (Bamber, Riva, Vermeersen, & LeBrocq, 2009; Gregory, 2013).

O aumento dos níveis eustáticos do mar, agravado pelo crescimento da frequência e magnitude de situações como tempestades ou furacões, ameaçam a baixa linha de costa (LEZC – *Low Elevation Coastal Zone*, 0 a 10 km) incluindo pequenas ilhas e zonas estuarinas. A LEZC comporta 2% da área terrestre do planeta, contudo é habitada por aproximadamente 10% da população mundial, ou seja, 600 a 700 milhões de habitantes vivem nesta zona sob ameaça, números que ilustram a magnitude e a característica global do desafio que é o SLR (Oliver-Smith, 2009).

Para além da subida do nível da água do mar, também acções antropogénicas (muito recentes à escala geológica), tornam pouco realista a completa compensação e “domesticação” dos desequilíbrios no meio ambiente, designadamente nos meios fluviais.

Em condições naturais, os meios fluviais, os ambientes estuarinos e a orla costeira estão num quase-equilíbrio, chamado “dinâmico equilíbrio natural”. Antigamente, acções forçadoras, processos sedimentares e a forma do leito aluvionar perturbavam o balanço, mas acabava sempre por se encontrar um novo equilíbrio natural. Contudo, na actualidade, no caso particular dos principais rios portugueses, a maioria está já condicionado. Quando nestes meios hídricos são efectuadas intervenções a curto prazo, estas são apenas situações pontuais que a natureza se encarregará de reavaliar e ultrapassar, com evidentes reflexos negativos. Logo, as soluções devem ser pensadas a longo prazo.

Neste trabalho o sistema fluvial em estudo foi o Baixo Mondego, mais precisamente, os cerca de 44 km do rio Mondego e braço Norte do estuário, que vão desde Coimbra à Figueira da Foz, onde desagua no Oceano Atlântico.

Nos anos 70 e 80 do séc. XX foram projectadas e construídas obras de regularização fluvial, com vista ao controlo do transporte sólido e assoreamento a jusante de Coimbra, de modo a evitar cheias e inundações no Baixo Mondego. De facto, as obras hidráulicas diminuíram a frequência destes fenómenos com prejuízos elevados na região. Contudo, desde a conclusão das obras de regularização do Baixo Mondego ocorreram umas cheias muito importantes em Janeiro de 2001 que poderão ter ficado a dever-se a uma combinação de diversos factores desfavoráveis, como o comportamento hidrológico inesperado do rio Ceira, uma operação menos coordenada da Barragem da Aguieira, ou o contributo de uma falta de manutenção dos diques do Baixo Mondego.

As cheias de Janeiro de 2001 foram a demonstração de que a gestão de um empreendimento com fins múltiplos, como uma barragem, em condições de segurança exige a conciliação de vários interesses e a procura de soluções óptimas que só poderão ser encontradas com base em critérios rigorosamente científicos (Carmo, 2004).

A teoria hidráulica apenas permite obter resultados aproximados, calculados a partir de hipóteses simplificativas. O restante trabalho de conservação das obras hidráulicas, dos sistemas fluviais e domínios hídricos de um modo geral, exige por parte do Homem permanentes medidas de gestão, monitorização, verificação e fiscalização. Nestas condições, o SLR e as suas possíveis consequências físicas devem deixar de ser questões periféricas e figurar no cume do interesse científico e político.

## 1.2 Objectivos

As simulações computacionais dos processos hidrodinâmicos e da dinâmica sedimentar a médio e longo prazo podem ajudar a antecipar a resposta do sistema fluvial, contribuindo para a precaução contra catástrofes naturais previstas (desenvolvimento lento) como a subida do nível do mar ou secas, e imprevistas (repentinas) como terremotos ou cheias. É particularmente importante que os modelos indiquem os sectores com tendências de assoreamento, estabilização e erosão.

A presente tese tem como principais objectivos:

1. Desenvolver um modelo computacional que permita simular a evolução a longo prazo da hidromorfologia de um rio, tendo como carácter inovador a introdução das previsões da subida do nível do mar como um dos parâmetros;
2. Aplicar o modelo desenvolvido ao Baixo Mondego fazendo um estudo da resposta do sistema fluvial, nomeadamente da sua dinâmica sedimentar, a diferentes cenários de subida do nível do mar. Estas simulações irão permitir antecipar a evolução do leito aluvionar e das alturas de água do troço em estudo nos próximos 100 anos, contribuindo assim, para a sua adequada gestão.

## 1.3 Estrutura da tese

Para o cumprimento dos objectivos traçados, a tese foi estruturada em 5 capítulos.

No primeiro capítulo apresentam-se as considerações gerais, onde se faz o enquadramento da tese, e são definidos os seus objectivos e estrutura.

No segundo capítulo, referente à revisão de literatura, é analisada a bacia hidrográfica, o percurso e o estuário do rio Mondego. Posteriormente, é dado um maior foco ao trecho do rio em estudo, fazendo a sua descrição e uma breve síntese histórica das obras de regularização fluvial do Baixo Mondego.

Neste capítulo são também referidas as bases teóricas da tese no que diz respeito à hidromorfologia, à subida do nível do mar e aos modelos numéricos de escoamentos em leitos móveis.

Quanto à hidromorfologia, são descritos os fenómenos de transporte sólido (origens e mecanismos), são mencionadas questões associadas aos sedimentos dos rios, nomeadamente, as suas dimensões e condições críticas para início de transporte das partículas. São também apresentadas breves notas sobre equações de transporte sólido.

Finalmente, são definidos os conceitos de caudal dominante e de tempo de reacção morfológica.

O terceiro capítulo inclui a metodologia aplicada nesta dissertação e os dados em análise, fazendo uma breve referência a alguns modelos computacionais de transporte sedimentar.

Posteriormente, o modelo desenvolvido é justificado e descrito. Neste capítulo são ainda mencionados todos os dados de entrada (*input*), designadamente os dados relacionados com a geometria do trecho em estudo, os dados hidráulicos (caudais líquidos, sólidos e alturas de água), o material sólido do leito aluvionar e os cenários de subida do nível do mar considerados.

No quarto capítulo é feita a análise dos resultados obtidos através da simulação computacional (*output*). Este capítulo inclui uma secção de calibração do modelo e outra de estudo das simulações no trecho. Para a calibração do modelo foram realizados quatro testes, variando os caudais sólidos e subida do nível do mar. As simulações no trecho, por sua vez, incluíram vinte cenários, modificando os caudais sólidos, o SLR e o tamanho médio dos sedimentos ( $D_{50}$  Modificar o nome?). Os resultados apresentados para as simulações no Baixo Mondego referem-se a previsões para 1, 10 e 100 anos e são analisados de acordo com as cotas de fundo, o assoreamento, a superfície livre e as alturas de água obtidos para cada cenário.

Finalmente, no quinto capítulo apresentam-se as conclusões e os contributos do estudo realizado, ou seja, do modelo desenvolvido e das previsões a longo prazo registadas para o Baixo Mondego. Também se mencionam as limitações da simulação computacional e dos dados disponíveis. São ainda feitas algumas recomendações para trabalhos futuros relacionados com modelos numéricos computacionais e o SLR aplicados a sistemas fluviais, e a adequada gestão deste trecho do Mondego.

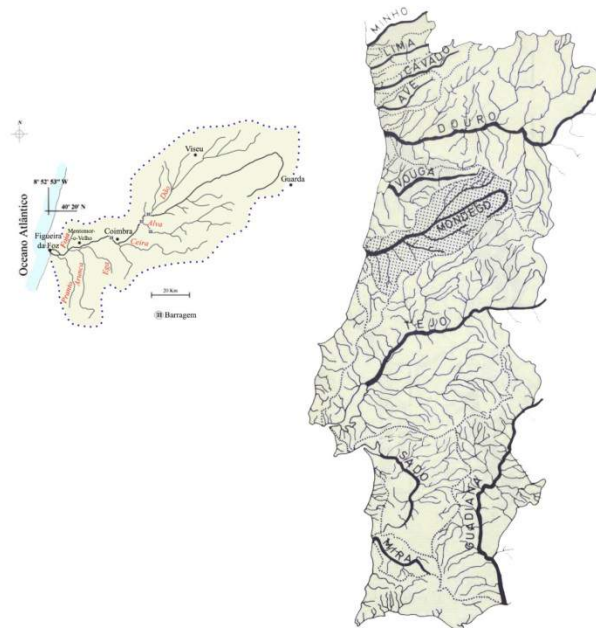
A presente dissertação possui três anexos, sendo que cada anexo contém imagens e tabelas correspondentes a um capítulo distinto. Assim, o Anexo I complementa o Capítulo II, o Anexo II o Capítulo III e o Anexo III o Capítulo IV.

# Capítulo II – Revisão da literatura

## 2.1 Rio Mondego

### 2.1.1 Características gerais

A bacia hidrográfica do rio Mondego localiza-se entre 39° 46' e 40° 48' de latitude norte e 7° 14' e 8° 52' de longitude oeste, cobre uma área de 6 671 km<sup>2</sup>, sendo a segunda mais extensa entre as bacias hidrográficas que se situam inteiramente em Portugal e abrange 48 concelhos (21 dos quais parcialmente). Como se pode observar na figura 2.1 tem uma forma do tipo alongado, com uma orientação sensivelmente Nordeste-Sudoeste (Soares, 1995; ARH Centro, 2012b).



**Figura 2.1** Localização e delimitação da bacia hidrográfica do rio Mondego. Adaptado de (Hidroprojecto, 1986).

A bacia hidrográfica é limitada a norte e a noroeste por uma série de elevações localizadas no planalto da Beira Alta, nomeadamente pelas serras da Lapa (953 m), do Caramulo (1 071 m) e do Buçaco (549 m), cujas linhas de cumeada as separam das bacias do Douro e do Vouga; e, a sueste e a sul é limitada pelas serras da Estrela (1 991 m), do Açor (1 409 m), da Lousã (1

204 m) e de Sicó (553 m) que a separam das bacias hidrográficas dos rios Tejo e Liz (Soares, 1995).

Do conjunto de rios cujas bacias hidrográficas se situam completamente em território português, o rio Mondego é o de maior extensão. Desenvolve-se ao longo de 234 km desde a nascente, localizada na Serra de Estrela a 1 547 m de altitude, até ao Oceano Atlântico junto à cidade da Figueira da Foz. Corre inicialmente para NNE (nor-nordeste), depois para NW (noroeste), e a partir de Celorico da Beira até à Figueira da Foz toma a direcção SW (sudoeste) (figura 2.2).

Os principais afluentes ao leito principal do rio Mondego são, na margem esquerda, os rios Alva, Ceira, Ega, Arunca e Pranto, e na margem direita, os rios Dão, Ançã e Foja (Soares, 1995).

A bacia hidrográfica do rio Mondego pode ser dividida em três sub-bacias fundamentais, de acordo com o sistema fluvial natural e as obras hidráulicas realizadas:

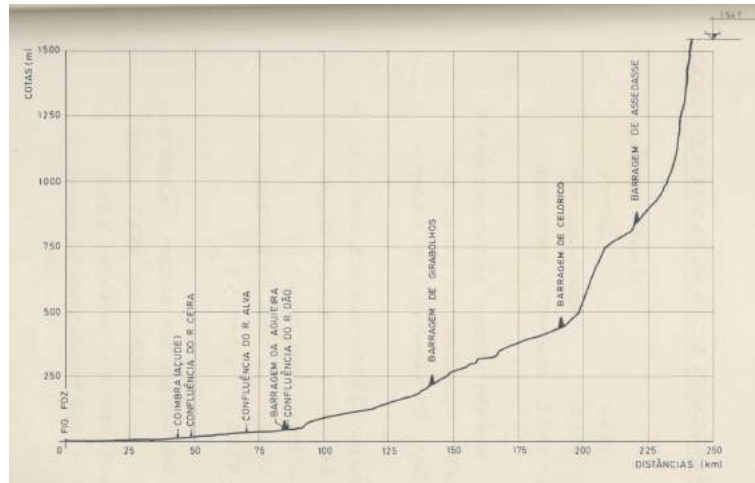
1. Bacia dominada pelo sistema Agueira-Raiva-Fronhas (3 750 km<sup>2</sup>);
2. Bacia intermédia, de Raiva a Coimbra (1 207 km<sup>2</sup>);
3. Bacia a jusante de Coimbra (campos do Baixo Mondego) (1714 km<sup>2</sup>) (Lencastre & Franco, 2010).

O percurso do leito principal do rio Mondego abrangido pela bacia dominada pelo sistema Agueira-Raiva-Fronhas inicia-se na nascente na Serra da Estrela, zona de cabeceira onde o rio corre num vale encaixado, a água se apresenta no estado mais puro e há menos intervenção do Homem. Neste local o Mondego atravessa o Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE) e corre entre granitos até ao distrito de Coimbra. Dos principais afluentes ao leito principal do rio, o Dão na margem direita conflui com o rio nesta sub-bacia, mais exactamente com a albufeira da Agueira. A Barragem de Fronhas, no rio Alva (concelho de Arganil) e o Açude de Raiva, no rio Mondego (concelho de Penacova) limitam esta bacia a jusante.

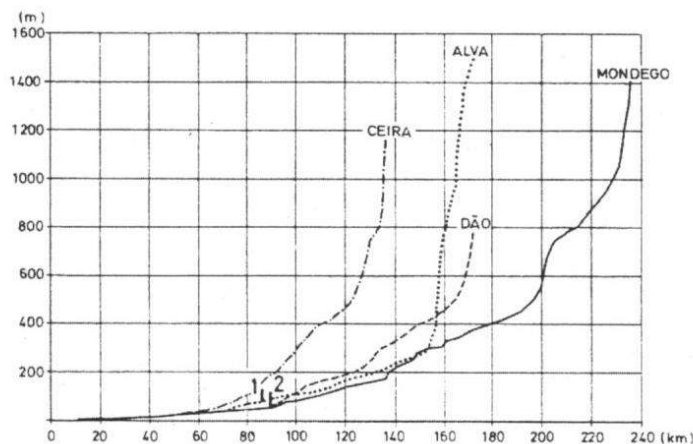
A bacia intermédia, que vai desde Raiva a Coimbra, caracteriza-se pela forte intervenção do Homem, nesta bacia o rio Mondego torna-se mais calmo por deixar de correr num vale tão encaixado. Dos principais afluentes ao leito principal do rio, o Alva e o Ceira na margem esquerda desaguam no leito nesta sub-bacia.

A sub-bacia a jusante de Coimbra é uma região de planície aluvial (Anexo I – Figura 1), o Baixo Mondego também chamado por campos do Mondego; é uma zona muito fértil e consequentemente, com forte exploração agrícola, particularmente na produção de arroz, o que provoca pressão humana e poluição indesejáveis. Na zona da Figueira da Foz, o estuário do Mondego já constitui uma espécie de reserva ambiental e ecológica. A pressão humana que se verifica nesta sub-bacia é também consequência das obras de regularização fluvial, que resultaram no controlo da meandrização do rio Mondego que se verificava nesta região e é

característica das planícies aluviais, assunto que será mais explorado na secção 2.1.3.2. Os afluentes ao leito principal do rio, que confluem com o leito no troço pertencente a esta bacia são o Ançã e Foja, na margem direita e o Ega, Arunca e Pranto, na margem esquerda.



**Figura 2.2** Perfil longitudinal do rio Mondego da nascente à foz, com localização de algumas das obras hidráulicas presentes no sistema (Hidroprojecto, 1986).



**Figura 2.3** Perfil longitudinal do rio Mondego e três dos seus principais afluentes – rio Ceira, Alva e Dão (Soares, 1995).

O escoamento anual médio expresso em altura de água sobre a bacia hidrográfica do rio Mondego é de 403 mm (PBH Rio Mondego, 1998). Por sua vez, o escoamento anual médio da bacia hidrográfica em volume gerado é de 4 642 km<sup>3</sup>.

Há uma elevada variabilidade interanual do escoamento no rio, por exemplo na secção terminal do Mondego o escoamento em ano médio é 3 790 217 dam<sup>3</sup>, enquanto que a relação com os caudais em anos húmidos e secos é a seguinte:

$$\frac{\text{Escoamento em ano húmido 80\%}}{\text{Escoamento em ano médio}} = 1,42$$

$$\frac{\text{Escoamento em ano seco 20\%}}{\text{Escoamento em ano médio}} = 0,56$$

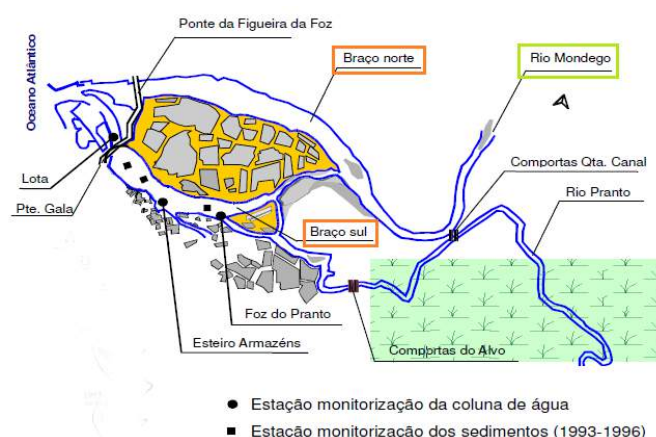
O regime do rio Mondego pode ser chamado de torrencial/semi-torrencial, devido à elevada diferença entre os caudais de cheia e de estiagem. Portanto, o regime hidrológico do rio Mondego é muito irregular.

É também um rio de regime pluvial, porque, embora parcialmente alimentado pela neve derretida proveniente da Serra da Estrela, a sua principal fonte de água é a chuva que devido ao relevo e grandes declives da bacia, lhe confere as características torrenciais. A precipitação anual média ponderada na bacia hidrográfica é de 1073 mm (Ferreira & Cunha, 1970; ARH Centro, 2012a; ARH Centro, 2011).

Segundo estimativa do INE (2011), a população residente na sub-região estatística do Baixo Mondego é de 332 306 habitantes (ARH Centro, 2012c).

### 2.1.2 O estuário do rio Mondego

O estuário do rio Mondego localiza-se entre 40° 12 e 40° 15 de latitude, e 8° 81' e 8° 85' de longitude e tem uma área de aproximadamente 3,4 km<sup>2</sup> (IPMA, 2014). A deposição de sedimentos a jusante levou à formação de uma ilha (Ilha da Murraceira) (Anexo I – Figura 2) que individualiza dois braços – braço Norte e braço Sul – os dois canais possuem características hidrográficas e morfológicas muito distintas, mas ambos percorrem uma distância de aproximadamente 7 km (figura 2.4).



**Figura 2.4** Estuário do rio Mondego. Adaptado de (Duarte, Vieira, Neto, & Pardal, 2008).

O braço Sul tem no máximo 2 a 4 m de altura de água em situação de maré alta, pois há muito assoreamento na zona mais a montante deste canal e a circulação da água é sobretudo resultado das marés, pois os caudais provenientes do rio Pranto são regulados por uma comporta, de acordo com as necessidades das plantações de arroz do vale e,



consequentemente, os escoamentos no Pranto têm pouca influência nos caudais afluentes ao braço Sul do estuário (Pereira, Vale, Ferreira, Pereira, Pardal, & Marques, 2007).

No braço Norte as alturas de água são mais elevadas, de 5 a 10 m em situação de maré alta, isto porque, como se pode observar na figura 2.4, o braço Norte está directamente ligado ao rio Mondego que drena cerca de 6 671 km<sup>2</sup> (bacia dominada pelo sistema Agueira-Raiva-Fronhas (3 750 km<sup>2</sup>); bacia intermédia (1 207 km<sup>2</sup>); bacia a jusante de Coimbra (1 714 km<sup>2</sup>)), o que juntamente com a intensa actividade agrícola que se verifica na planície do Baixo Mondego faz com que a cota do fundo do rio suba, e por conseguinte se verifiquem neste canal alturas de água maiores que no braço Sul. As linhas de costa também foram artificialmente elevadas e cobertas com rochas, eliminando os sedimentos mais gastos da zona intertidal do canal. Na região montante do braço Norte pode-se encontrar uma mistura de materiais grosseiros transportados pelo rio e areias marinhas, enquanto que na parte jusante encontram-se apenas partículas finas, indicando que nesta zona os caudais líquidos e sólidos são maioritariamente influenciados pela costa Atlântica (Pereira, Vale, Ferreira, Pereira, Pardal, & Marques, 2007).

## **2.1.3 Troço a modelar – Baixo Mondego**

### **2.1.3.1 Descrição geral**

Estudos realizados comprovam que, no que diz respeito às alterações climáticas, quanto mais local for o nível a que se está a modelar, tanto melhores serão os resultados, ou seja, serão mais homogêneos com as tendências das mudanças climáticas. Assim, optou-se por estudar apenas o troço do rio Mondego que vai desde o Açude-Ponte de Coimbra até ao Oceano Atlântico pelo braço Norte do estuário, resultando numa distância de aproximadamente 44 km (37 km de rio Mondego + 7 km de braço Norte do estuário). Como já foi referido, todo o canal em estudo se situa na área genericamente conhecida como Baixo Mondego, uma planície aluvial numa região complexa porque é de interface entre diferentes sistemas geomorfológicos, cársicos, fluviais, marinhos, eólicos, estuarinos e de vertente. O braço Norte do estuário também foi modelado uma vez que se trata do canal estuarino que vem no seguimento do leito principal do rio Mondego, e por conseguinte possui, a montante uma influência fluvial e a jusante uma hidrodinâmica e dinâmica sedimentar com influência maioritariamente do Oceano Atlântico, ou seja, importante para o estudo do impacto da subida do nível do mar no troço (Cunha & Almeida, 2008; Tanguy, 2010).

### **2.1.3.2 Síntese histórica – Obras de regularização fluvial no Baixo Mondego**

No passado, devido ao regime hidrológico irregular do rio Mondego e às características morfológicas da bacia hidrográfica e do leito aluvionar que resultaram no assoreamento da secção mais a jusante do rio, ocorriam frequentemente grandes cheias e extensas inundações nos campos do Mondego, sendo o rio popularmente designado por “bazófias”. Assim, desde

cedo houve intervenções antropogénicas com vista à diminuição dos prejuízos das cheias e inundações na região (LNEC, 2012; Cunha, Soares, Tavares, Almeida, & Santos, 1999).

A primeira obra de regularização de maior relevo aconteceu no final do século XVIII, quando o leito do rio Mondego foi regularizado com o objectivo de evitar a excessiva meandrização do Baixo Mondego, e assim reduzir o assoreamento. Foi um projecto elaborado pelo padre Estevão Cabral que consistiu no esquecimento do “Rio Velho” e escavamento do “Rio Novo”, dando origem a um canal quase rectilíneo entre Coimbra e a Figueira da Foz. Contudo a obra não se mostrou eficaz, uma vez que a excessiva eliminação de meandros provocou um aumento da inclinação do fundo e da capacidade de transporte sólido, e por conseguinte houve demasiada erosão a montante no troço regularizado, e continuação de excesso de assoreamento a jusante do troço onde se efectuou a intervenção.

A situação descrita fez com que o risco de cheia nas planícies do Baixo Mondego continuasse eminente, o agora leito principal do rio passou a atingir cotas superiores às dos terrenos das margens com frequência, dando origem a inundações com igual ou maior frequência (Lencastre & Franco, 2010).

Perante esta conjuntura nos anos 60 e 70 do séc. XX foram realizados estudos e trabalhos com vista à regularização fluvial da região, tratando-se das primeiras grandes obras neste âmbito projectadas em Portugal. Os programas de desenvolvimento no Baixo Mondego começaram por ganhar destaque quando, em 1962 a Direcção Geral de Serviços Hidráulicos elaborou o “Plano Geral de Aproveitamento Hidráulico da Bacia do Mondego”, e mais tarde, em 1971 a Hidroprojecto concluiu o Anteprojecto da “Regularização do Baixo Mondego” (Cunha, Soares, Tavares, Almeida, & Santos, 1999; Hidroprojecto, 1986).

As obras pretenderam controlar os caudais líquidos e sólidos do rio, reduzindo o caudal de cheia de 1:100 anos do leito maior em Coimbra de 3 700 m<sup>3</sup>/s para 1 200 m<sup>3</sup>/s (LNEC, 2012), e o caudal sólido médio em Coimbra de 7,5 l/s para 1,5 l/s (Anexo I – Tabela 1) (figura 2.6). Para tal foram previstas as seguintes obras/medidas:

- Barragens da Aguieira, de Fronhas e Açude de Raiva;
- Sistema de previsão de cheias na bacia hidrográfica;
- Revestimento florestal e correcção torrencial em toda a bacia, incluindo arborização das cabeceiras.

Para a protecção dos campos contra cheias houve ainda:

- Construção de diques de defesa longitudinais ao longo das margens do leito;
- Instalação de sistema de inundação controlada dos campos para as cheias de menor frequência;
- Novo redimensionamento dos leitos aluvionares do Baixo Mondego.

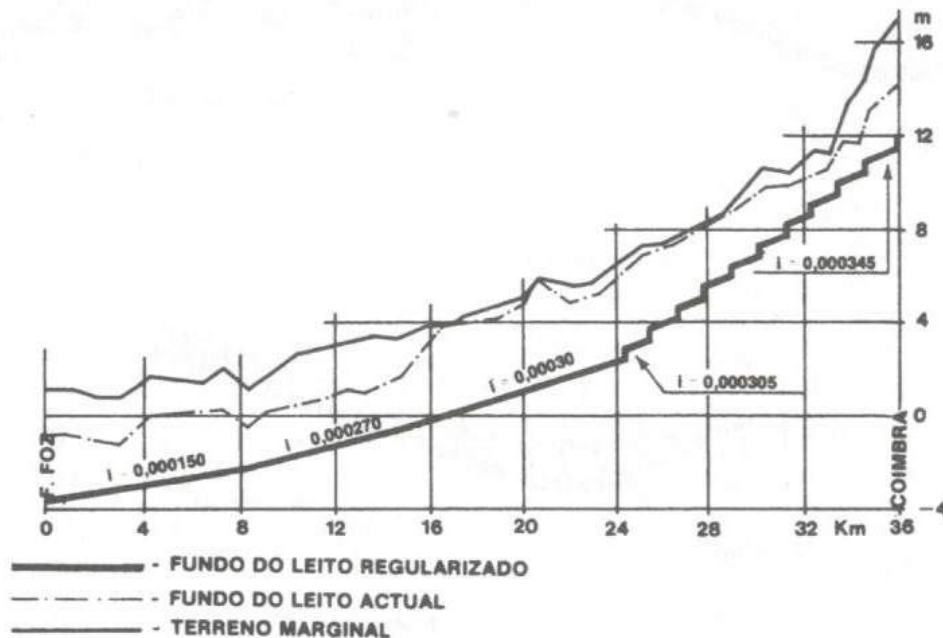
As obras para a regularização do leito e medidas para o controlo de cheias e inundações no Baixo Mondego fizeram com que fosse possível a instalação de um sistema de rega para incrementar o aproveitamento hidroagrícola da planície aluvial (ARH Centro, 2012b).

As obras de regularização fluvial iniciadas nos anos 70 e 80 do século passado permitiram também a construção de redes de drenagem e enxugo.

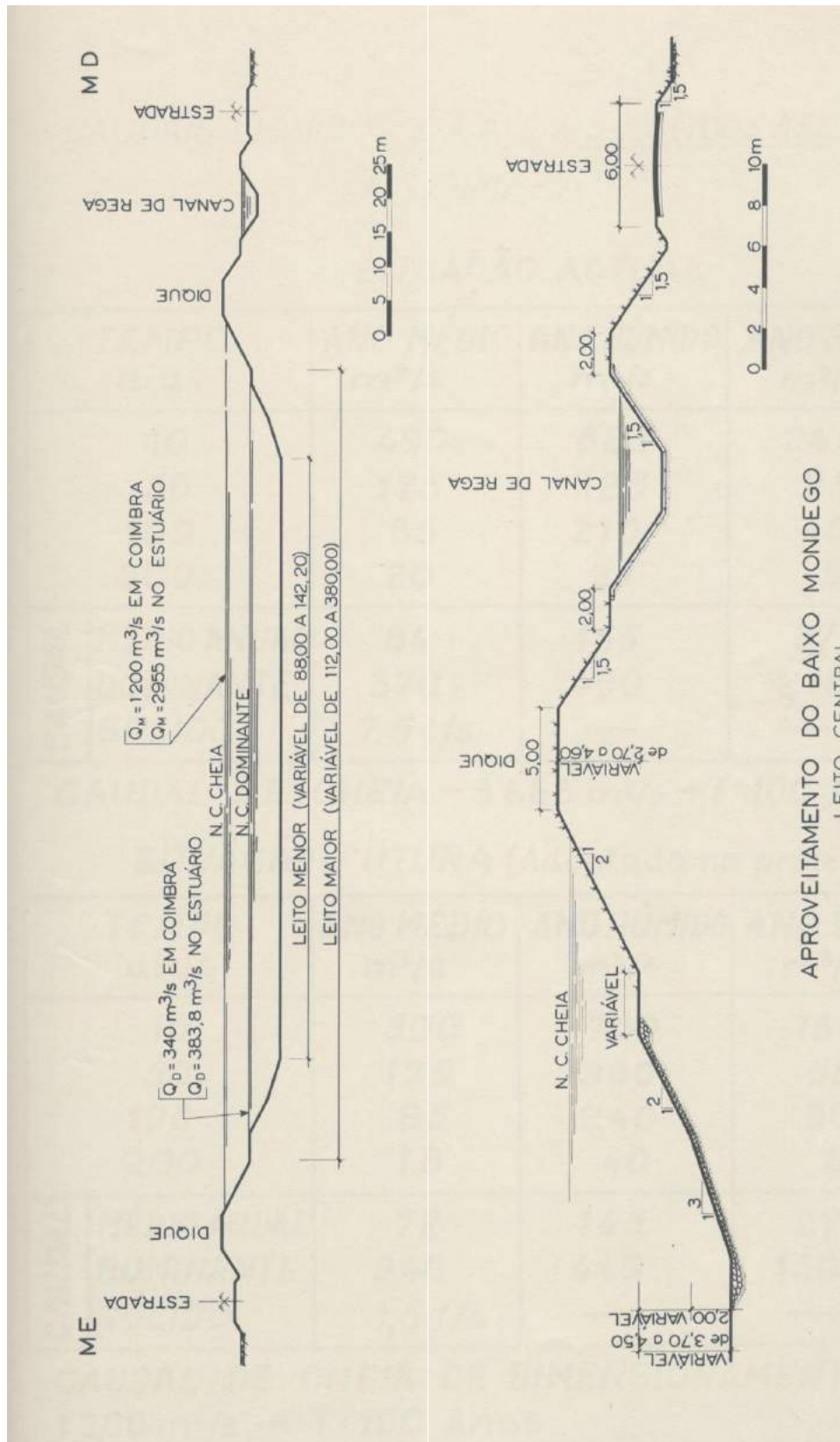
Para complementar as reformas no Baixo Mondego houve ainda a remodelação da rede de esgotos e criação de uma ETAR, a renovação da rede viária na região e a construção do aproveitamento do Açude-Ponte de Coimbra que, tal como o nome indica, é também uma travessia no rio Mondego (Hidroprojecto, 1986).

Como consequência das construções no âmbito da regularização fluvial, os rios afluentes ao Mondego passaram a escoar através de (a) um Leito Central que canaliza as águas afluentes à secção de Coimbra, (b) dos Leitos Periféricos Direito e Esquerdo que colectam os caudais das linhas de água de maior dimensão, e (c) pelos Leitos Regularizados dos troços terminais dos afluentes principais Ega e Arunca (Anexo I – Figura 3) (Lencastre & Franco, 2010).

Dos projectos de regularização do Baixo Mondego resultaram os perfis longitudinais e transversais da figura 2.5 e 2.6, respectivamente.



**Figura 2.5** Regularização do Baixo Mondego: perfil longitudinal do leito central (Lencastre & Franco, 2010).

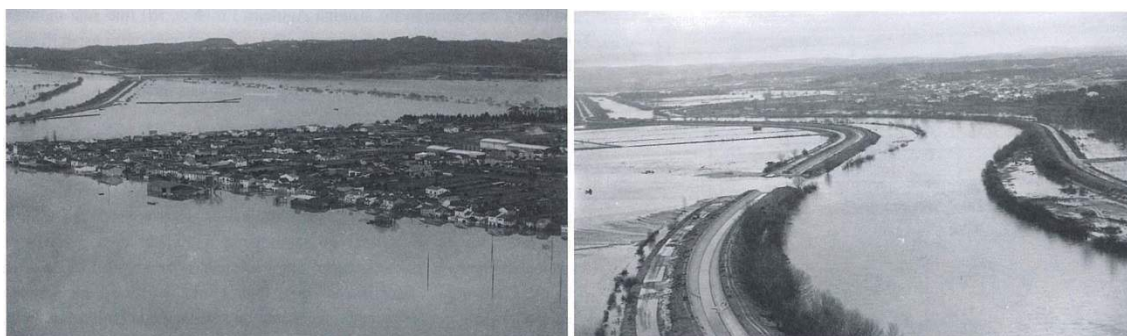


**Figura 2.6** Regularização do Baixo Mondego: perfis transversais tipo (Hidroprojecto, 1986).

Estas obras de regularização fluvial contribuíram para a diminuição da frequência e prejuízos das cheias e inundações no Baixo Mondego. Contudo desde a sua conclusão, com particular destaque para a construção da Barragem da Aguieira (entre 1972 e 1982) que os espaços ribeirinhos do Mondego, particularmente a jusante de Coimbra, estão cada vez mais sujeitos a pressão humana. Na verdade, com estas mudanças a população passou a estar mais confiante, ocupando cada vez mais os leitos de inundação e esquecendo os riscos de cheia (Louro & Lourenço, 2005). “Com efeito, não é admissível que obras com carácter permanente e uma importante função social sejam construídas em áreas de elevado risco, como sejam, por exemplo, os casos da ETAR de Ribeira de Frades e o Quartel dos Bombeiros de Montemor-o-Velho, que foram inundados em consequência das cheias de Janeiro de 2001” (Carmo, 2004).

A pressão urbana acompanhada da destruição dos sistemas ripícolas provocou a impermeabilização dos solos. Assim, tendo em conta que o rio Mondego possui um regime pluvial os riscos de cheias, ainda que com menor frequência devido às obras de regularização fluvial, continuam a ser uma realidade inevitável e agravada pela pressão humana (ARH Centro, 2012b).

Em 2001 ocorreu uma cheia cuja ponta ultrapassou  $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ , causando a inundação generalizada dos campos do Baixo Mondego. As fotografias da figura 2.7 revelam a violência das cheias ocorridas a 27 de Janeiro, das quais resultaram elevados prejuízos e graves consequências. No período de 26 a 30 de Janeiro desse mesmo ano verificaram-se 14 rupturas nos diques do Baixo-Mondego - no Canal Principal, sobretudo na margem esquerda, e no Leito Periférico (Montemor-o-Velho), resultando no rápido e violento alagamento dos campos (foto à direita) (ARH Centro, 2011).



**Figura 2.7** (à esquerda) Vista aérea, mostrando ao fundo a planície aluvionar completamente inundada e, em primeiro plano, a povoação de Ereira já convertida em ilha; (à direita) Panorama da ruptura no dique direito do Canal Principal (Baixo Mondego), junto a Santo Varão (fotos de A. Carriço, 2001/01/30) (Carmo, 2004).

Portanto, apesar das obras de grande dimensão realizadas, os riscos de inundação continuam presentes. Por se tratar de uma região de risco de cheia e inundações, é essencial uma permanente gestão do sistema fluvial. São necessárias medidas como (i) o planeamento e ordenamento do espaço drenado pela bacia hidrográfica do rio Mondego, propondo alternativas para o uso dos solos; (ii) o cumprimento das normas de manutenção, legislação e fiscalização; e (iii) completar e manter com elevados padrões de operacionalidade a regularização dos

caudais do Mondego e seus afluentes (Louro & Lourenço, 2005; ARH Centro, 2012b). Na gestão do regime hidrológico do Baixo Mondego deve agora também incluir-se a subida do nível do mar, uma vez que a zona mais a jusante do canal pode ser afectada pelas marés do Atlântico e consequentemente, os problemas de assoreamento podem voltar.

## **2.2 Hidromorfologia**

### **2.2.1 Transporte sólido – origens e mecanismos**

Consoante o mecanismo e a origem podem considerar-se 4 tipos de transporte sólido em rios:

#### A – Transporte sólido por arrastamento (mecanismo)

Trata-se do movimento de partículas em contacto com o fundo do leito, rolando ou escorregando.

“Nesta forma de transporte sólido, as partículas têm pois uma velocidade de deslocação irregular, com um valor médio muito inferior à velocidade de escoamento” (Lencastre & Franco, 2010).

Ao longo dos anos, muitas fórmulas foram desenvolvidas para descrever este mecanismo, algumas completamente experimentais e outras baseadas num modelo de transporte. Tipicamente, as equações obtidas não têm em conta o mecanismo referido em seguida (transporte sólido em suspensão (B)) (ver mais em 2.1.5) (NEDECO, 1973).

#### B – Transporte sólido em suspensão (mecanismo)

É o movimento de partículas no escoamento da água. O que se verifica neste mecanismo é que há uma contínua tendência para a sedimentação das partículas devido à força da gravidade, mas esta situação é permanentemente contrabalançada pela acção difusiva do campo turbulento das correntes, havendo assim partículas que são transportadas em suspensão (Rodrigues & Fonseca, 2012).

Quando as condições de escoamento são constantes, a velocidade das partículas em suspensão tem pequenas variações, e o seu valor médio é próximo do valor da velocidade média do caudal líquido (Lencastre & Franco, 2010).

Contudo, o material sólido regressa eventualmente ao leito do rio, excepto se forem partículas  $< 50 \mu\text{m}$  (do tipo (D)) e, quando volta, outro material sólido do leito entrará eventualmente em suspensão. Consequentemente, a concentração de partículas transportadas através deste mecanismo não muda rapidamente nas várias camadas (NEDECO, 1973).

Nos escoamentos sobre fundo móvel, por vezes não há uma distinção nítida entre o mecanismo de transporte que se está a verificar, pelo que pode também ser considerada uma forma de transporte de características intermédias, o transporte por saltação. Neste, as partículas deslocam-se por saltos, alternando-se as fases de transporte por arrastamento com as fases de transporte em suspensão (Lencastre & Franco, 2010). Alguns autores incluem o transporte por saltação no transporte por arrastamento.

#### C – Transporte sólido do fundo – *bed-load* (origem)

Consiste no movimento das partículas que definem a morfologia dos leitos aluvionares e que podem ser transportadas pelos mecanismos (A) e (B), consoante as condições do fundo e do escoamento (Rodrigues & Fonseca, 2012).

Quando são feitas medições de *bed-load* é importante ter em conta que este tipo de transporte tem lugar consoante a propagação das formas do fundo, no topo das dunas a intensidade de transporte é grande e nos baixios ou fundões é pequena ou nula. Logo, quando o transporte sólido do fundo é medido deve-se, pelo menos, cobrir o período de tempo necessário para várias dunas passarem pela secção de medição (NEDECO, 1973).

#### D – Transporte de sólidos muito finos – *wash-load* (origem)

Trata-se do movimento do material sólido através do mecanismo (B), refere-se a partículas com  $< 50 \mu\text{m}$  que, tal como se pode verificar na tabela 2.1 – correspondem a silte ou argila (ou ainda colóides) que podem ter influência na viscosidade. O *wash-load* provém de fontes externas, ou seja, da climatologia da região e da erosão da bacia hidrográfica do rio. Devido à sua lenta velocidade de queda, a concentração vertical em águas turbulentas é aproximadamente uniforme e as partículas não influenciam a forma do fundo de rios aluvionares. Logo, os sólidos muito finos só contribuem para a sedimentação quando os caudais líquidos são muito reduzidos, como por exemplo albufeiras, situação que não se aplica ao caso em estudo (Rodrigues & Fonseca, 2012; NEDECO, 1973).

Denomina-se por transporte sólido total, o conjunto do material transportado por arrastamento (A) e em suspensão (B) (Lencastre & Franco, 2010).

### **2.2.2 Dimensão das partículas**

As proporções relativas do material transportado por arrastamento ou em suspensão variam, usualmente, com a distância à nascente dos cursos de água. Nos troços iniciais, isto é, nas zonas de montanha predomina o transporte por arrastamento e as partículas de maiores dimensões, enquanto nos troços finais, normalmente nas zonas de planície, tende a

predominar o transporte em suspensão e as partículas de menores dimensões (Lencastre & Franco, 2010).

Há duas principais razões que explicam este fenómeno:

- Abrasão/atrito – durante o transporte as partículas vão colidindo e desgastando-se, processo que acontece sobretudo com sedimentos como seixos e cascalhos (tabela 2.1), que rompem e partem;
- Granulometria dos sedimentos – as maiores partículas, regra geral, não podem ser transportadas até jusante, ficando na zona de nascente (montanha); quando são transportadas é por curtas distâncias e rapidamente voltam a ser depositadas. Em contraste, as partículas com diâmetro pequeno podem viajar longas distâncias (Tanguy, 2010).

É difícil determinar qual destes dois factores é predominante, mas nos troços mais a jusante, como o troço em estudo, naturalmente será o diâmetro médio das partículas.

A dimensão das partículas é uma forma de classificação dos sedimentos. Sternberg (1875) fez uma formulação empírica para a diminuição do diâmetro médio das partículas de montante para jusante, que tem como limitação não poder considerar afluentes laterais, isto é, *inputs* sedimentares ao longo da distância do rio em estudo (Tanguy, 2010) (figura 2.8):

$$W = W_0 \times e^{-\alpha L} \quad (2.1)$$

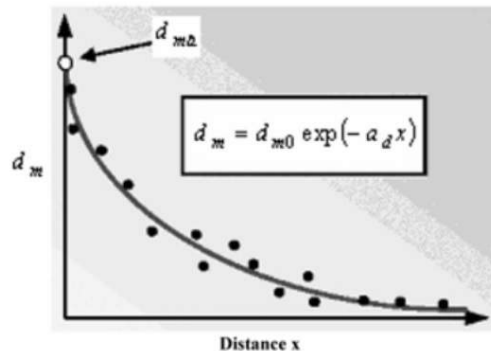
em que:

$W$  – diâmetro médio dos sedimentos numa distância  $L$  (m);

$L$  – distância à secção onde o diâmetro médio é  $W_0$  (m);

$W_0$  – diâmetro médio dos sedimentos na secção de montante,  $L = 0$  m (m);

$\alpha$  – coeficiente que reflecte a granulometria e abrasão, determinado a partir de observações e obtido de acordo com a natureza das partículas e as características do rio ( $m^{-1}$ ) (NEDECO, 1973).



**Figura 2.8** Diminuição exponencial do diâmetro médio dos sedimentos ao longo do perfil longitudinal do rio (Tanguy, 2010).

Duas das escalas mais usadas para a classificação dos sedimentos de acordo com o diâmetro são a escala de Wentworth e a escala de Atterberg apresentada na tabela 2.1. A escala de Wentworth é utilizada em sedimentologia e petrologia, enquanto a escala de Atterberg é geralmente empregue na engenharia civil e geológica, e ainda na hidrogeologia e geotécnica. Normalmente, nestas escalas não estão incluídos os colóides (Haldar, 2013).



**Tabela 2.1** Classificação de partículas sólidas através da sua dimensão pela Escala de Atterberg. Adaptado de (Haldar, 2013).

Dimensões	Classe (Escala de Atterberg)
> 63 mm	Seixos
20 – 63 mm	Cascalho grosseiro
6,3 – 20 mm	Cascalho médio
2 – 6,3 mm	Cascalho fino
0,63 – 2 mm	Areia grosseira
0,2 – 0,63 mm	Areia média
0,063 – 0,2 mm	Areia fina
0,02 – 0,063 mm	Silte grosseira
0,0063 – 0,02 mm	Silte média
0,002 – 0,0063 mm	Silte fina
< 0,002 mm	Argila

A distribuição cumulativa da dimensão da maioria dos sedimentos pode ser aproximada por uma distribuição log-normal, e através desta distribuição podemos obter o diâmetro médio,  $D_m$ , pela expressão (Rodrigues & Fonseca, 2012):

$$D_m = \frac{\sum p_i D_i}{\sum p_i} \quad (2.2)$$

em que,

$D_i$  – média geométrica dos limites das dimensões das fracções (m);

$p_i$  – fracção com o diâmetro  $D_i$ .

Derivados desta expressão obtemos os seguintes diâmetros:

$D_p$  – significa que  $p\%$  dos diâmetros das partículas da mistura é mais pequena que  $D_p$ ;

$D_{50}$  – diâmetro mediano (50% dos diâmetros das partículas da mistura são inferiores/superiores a  $D_{50}$ );

$D_g$  – diâmetro médio geométrico é o correspondente a  $D_{50}$  para a distribuição log-normal, que pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$D_g = (D_{84} \times D_{16})^{1/2} \quad (2.3)$$

Podemos calcular ainda o desvio padrão geométrico,  $\sigma_g$ :

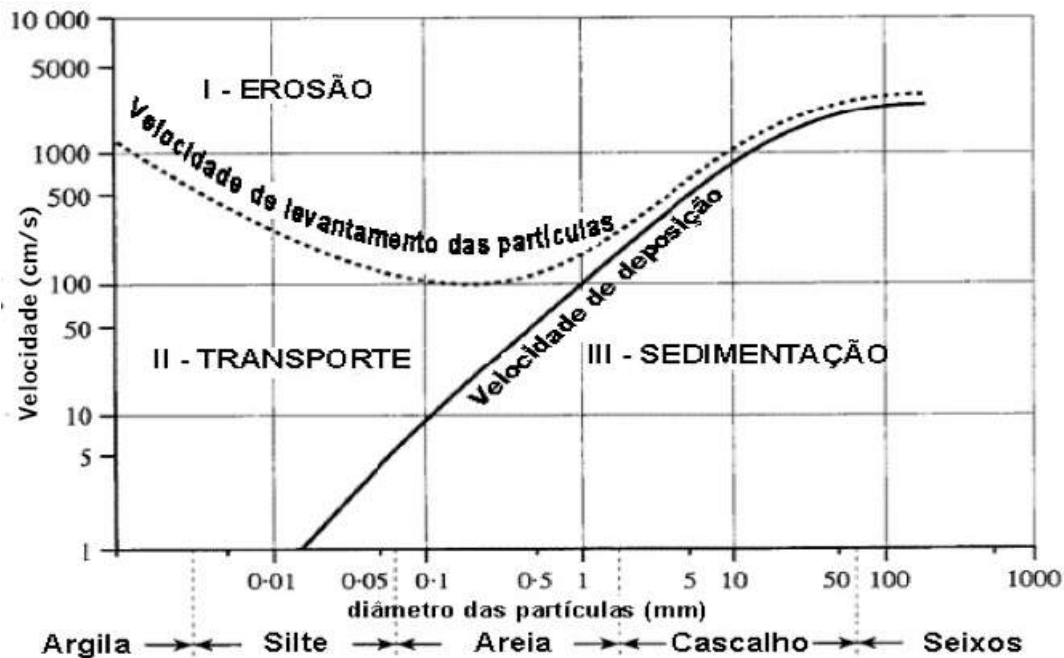
$$\sigma_g = \left| D_{84} / D_{16} \right|^{1/2} \quad (2.4)$$

Com base nestas expressões obtêm-se curvas granulométricas.

### 2.2.3 Condições críticas

As condições críticas são as condições em que as partículas iniciam o movimento, quando uma partícula sedimenta será necessária mais energia para se começar a movimentar do que para uma partícula que já está em movimento. As condições críticas são expressas em função das velocidades de escoamento e das tensões tangenciais exercidas sobre as partículas.

Para descrever o início do movimento das partículas em função da velocidade, normalmente é utilizado o ábaco da figura 2.9. Nesta imagem é possível verificar que para velocidades de escoamento muito reduzidas só há movimento de partículas como colóides ou argilas, isto é, só há transporte em suspensão. O transporte por arrastamento, por sua vez, irá ocorrer para velocidades superiores a cerca de 5 cm/s. Assim, conclui-se que para analisar a estabilidade do fundo dos canais é importante saber a velocidade média do escoamento.



**Figura 2.9** Velocidades críticas (em cm/s), segundo HUIJSTRÖM. Adaptado de (Vaugh, 2009; Lencastre & Franco, 2010).

A limitação deste diagrama (figura 2.9) é considerar que as partículas possuem um diâmetro uniforme; devido a esta limitação foi desenvolvido o critério das tensões críticas, que resultou nos diagramas de Shields (figura 2.10).

Nesta figura, (a) relaciona o número de Reynolds  $Re$  com a tensão de arrastamento  $\tau$  ( $N/m^2$ ), originando a curva de Shields e (b) relaciona a tensão crítica de arrastamento  $\tau_{oc}$  com o diâmetro das partículas. Estes diagramas ultrapassam a limitação do anterior porque para material incoerente com sedimentos de dimensões variadas, pode substituir-se o valor atribuído ao diâmetro das partículas pela mediana da curva granulométrica do material incoerente.

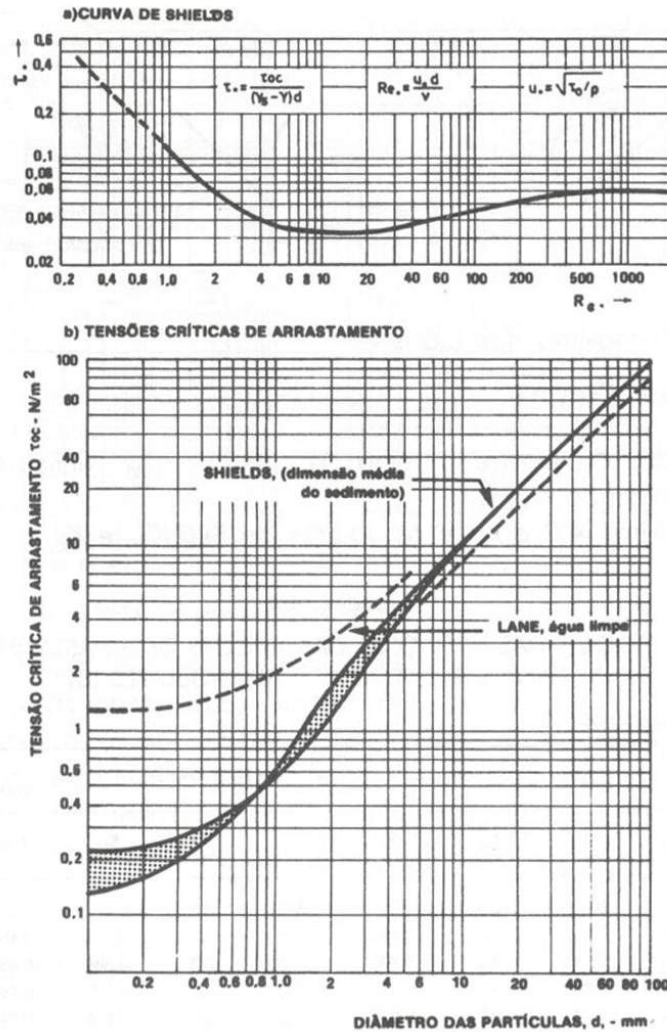


Figura 2.10 Diagramas de Shields (Lencastre & Franco, 2010).

#### 2.2.4 Caudal dominante

O conceito de caudal dominante de um rio ( $Q_D$ ) baseia-se na hipótese de um valor constante de caudal líquido que, escoando em permanência, teria sobre a morfologia do rio os mesmos efeitos médios de arrastamento que as sucessões de caudais variáveis que ocorrem efectivamente (Lencastre & Franco, 2010).

O valor de  $Q_D$  pode ser estimado a partir da seguinte fórmula:

$$Q_D = \frac{\sum n_i \bar{Q}_i \bar{S}_{ai} \Delta Q_i}{\sum n_i \bar{S}_{ai} \Delta Q_i} \quad (2.5)$$

em que:

$n_i$  – nº de ocorrências;

$Q_i$  – respectivo valor médio ( $m^3/s$ );

$S_{ai}$  – caudal sólido por arrastamento ( $m^3/s$ );

$\Delta Q_i$  – intervalo de valores de caudais líquidos ( $m^3/s$ ) (Prins & de Vries, 1971).

O caudal dominante do rio Mondego foi calculado em  $340 m^3/s$  (Lencastre & Franco, 2010).

## 2.2.5 Equações de transporte sólido

Não é possível fazer uma divisão restrita entre o transporte por arrastamento e o transporte em suspensão uma vez que os mecanismos estão interrelacionados. Logo, não é surpreendente que as equações de transporte sólido total tenham uma construção semelhante às equações de transporte de material do fundo.

Quando se pretende obter valores diferenciados para os dois mecanismos de transporte sólido, o mais habitual é recorrer a técnicas de medição *in situ*, uma vez que existem métodos para medir o transporte sólido por arrastamento e em suspensão separadamente (NEDECO, 1973).

A capacidade de transporte sólido é o caudal sólido ( $S$ ) que o rio pode transportar em saturação para determinadas condições hidráulicas e de granulometria. Há duas abordagens para calcular a capacidade de transporte, (i) utilizando um único diâmetro, representativo dos sedimentos transportados, ou (ii) com base em várias classes de partículas de acordo com o seu diâmetro.

Em seguida, são apresentadas algumas das mais utilizadas equações de transporte sólido:

- Equação de Meyer-Peter e Müller (1948)

Aplica-se apenas ao transporte sólido por arrastamento e pode ser dada pela seguinte expressão (NEDECO, 1973):

$$S = A(Q - 0.047)^{3/2} \quad (2.6)$$

em que,

$S$  – transporte sólido (por arrastamento) ( $m^3/s$ )

$A$  – constante, geralmente  $A = 8$  (há algumas exceções, para o rio Níger os dados só se adaptam quando  $A = 6,5$ )

$Q$  – caudal líquido ( $m^3/s$ ), valor que é obtido através da expressão:

$$Q = \frac{\Delta D}{\mu h I} \quad (2.7)$$

em que,

$\Delta$  – densidade relativa das partículas =  $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$

$D$  – diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) (m)<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> O diâmetro calculado é o mediano mas comumente é denominado diâmetro médio.

$\mu$  – *ripple factor* (normalmente ignorado)

$h$  – altura da água (m)

$I$  – declive do fundo do rio (m/m)

- Equação de Einstein-Brown (1950) (TST)

Utiliza-se para o cálculo do transporte sólido total e pode ser escrita do seguinte modo (NEDECO, 1973):

$$\frac{S}{F} = 40Q^{-3} \quad (2.8)$$

onde,

$$F = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{\Delta g D^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{\Delta g D^3}} \quad (2.9)$$

em que,

$F$  – ( $m^{1/2}/s$ )

$S$  – transporte sólido (por arrastamento) ( $m^3/s$ )

$Q$  – caudal líquido ( $m^3/s$ )

$v$  – viscosidade cinemática da água ( $m^2/s$ )

$g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$D$  – diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) (m)

- Equação de Engelund-Hansen (1967) (TST)

Destina-se ao cálculo do transporte sólido total e pode ser dada pela seguinte expressão (Cunge, Holly, & Verwey, 1980):

$$S = 0,05 \rho_s \frac{Lu^2}{Q} \frac{(IR)^{3/2}}{\sqrt{g}(\rho_s/\rho-1)^2 D} \quad (2.10)$$

em que,

$\rho_s$  – massa volúmica dos sedimentos ( $kg/m^3$ )

$L$  – largura do rio (m)

$u$  – velocidade média do escoamento (m/s)

$I$  – declive do fundo do rio (m/m)

$R$  – raio hidráulico (m)

$g$  – aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )

$\rho$  – densidade da água ( $kg/m^3$ )

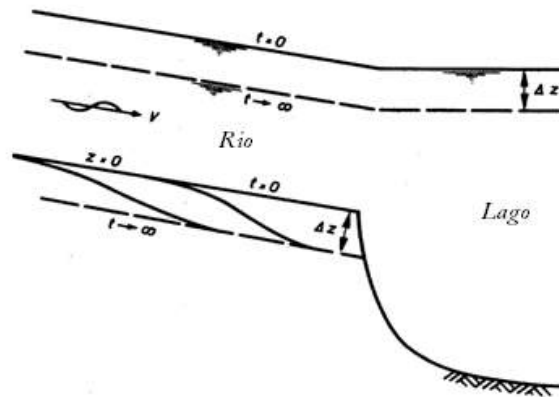
$D$  – diâmetro médio das partículas ( $D_{50}$ ) (m)

## 2.2.6 Tempo de reacção morfológica

A resposta temporal de um rio é um problema clássico da Hidráulica Fluvial e consiste no tempo que um rio leva a reagir a determinadas alterações impostas numa secção.

Um exemplo de uma alteração numa secção do rio poderá ser a subida do nível do mar; neste caso vamos impor uma mudança nas condições de fronteira do escoamento do rio a jusante (Prins & de Vries, 1971; Rodrigues A. C., 2010).

O tempo de reacção morfológica foi definido por Prins e de Vries (Prins & de Vries, 1971) como sendo uma medida do tempo que leva a morfologia do fundo de um rio a adaptar-se às novas condições de escoamento provocadas pela descida de  $\Delta z$  do nível da água, admitindo-se que o regime hidrológico dos caudais líquidos se manteria idêntico, tal como se pode observar na figura 2.11.



**Figura 2.11** Representação do tempo de reacção morfológica segundo Prins e de Vries (Prins & de Vries, 1971).

O tempo de reacção morfológica é dado pela seguinte expressão:

$$N_{50} = \frac{Lm^2}{Y} \quad (2.10)$$

onde:

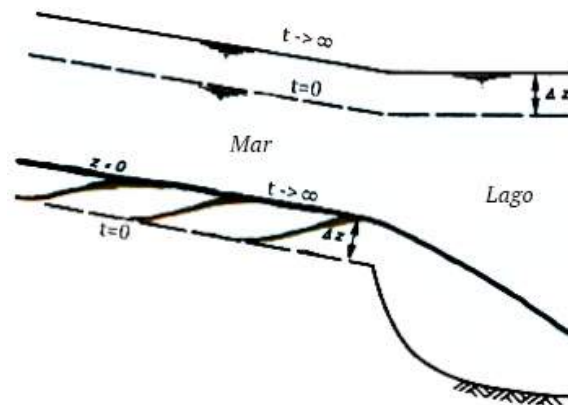
$Lm$  – distância padrão (km), esta é a distância da secção de jusante onde ocorre a referida descida do nível de água. Normalmente o valor atribuído a  $Lm$  é 200 km, e:  $Lm > \frac{3h}{I}$

em que,  $h$  – altura de escoamento (m) e,  $I$  – declive do fundo do rio (m/m);

$Y$  – caudal sólido total anual ( $m^3$ );

$N_{50}$  – tempo de reacção morfológica (anos), será o número de anos necessário para que a cota do fundo do rio baixe 50% do valor final de  $\Delta z$  numa secção a uma distância  $x = Lm$  da secção de jusante onde ocorrerá a referida descida do nível de água.

O indicador  $N_{50}$  dá uma ideia de como um rio responderá mais ou menos rapidamente, em termos de erosão ou de assoreamento generalizado, a modificações introduzidas no seu leito, nomeadamente à subida do nível do mar, que levará a uma situação análoga à atrás descrita (subida de  $\Delta z$ ). Em ambas as situações, a morfologia do fundo do rio tenderá a adaptar-se a uma nova situação de equilíbrio hidromorfológico (figura 2.12) (tabela 2.2) (Rodrigues A. C., 2010). No caso específico em estudo, será motivado o assoreamento generalizado a jusante, que irá conduzir a um declive médio do fundo igual ao que existia anteriormente às obras de regularização fluvial, mas a longo prazo (escalas temporais superiores a 100 anos), assunto que será analisado com mais pormenor nos Capítulos IV e V.



**Figura 2.12** Tempo de reacção morfológica com assoreamento do rio. Adaptado de (Prins & de Vries, 1971).

O valor de  $N_{50}$  para alguns dos rios mais conhecidos do Mundo é apresentado na tabela 2.2.

**Tabela 2.2** Tempos de reacção morfológica,  $N_{50}$ . Adaptado de (Rodrigues A. C., 2010).

Rio	$N_{50}$ (anos)
Reno (Holanda)	1000
Danúbio (Hungria)	500
Magdalena (Colômbia)	100
Tana (Quênia)	120
Apure (Venezuela)	110
Tejo (Portugal)	600

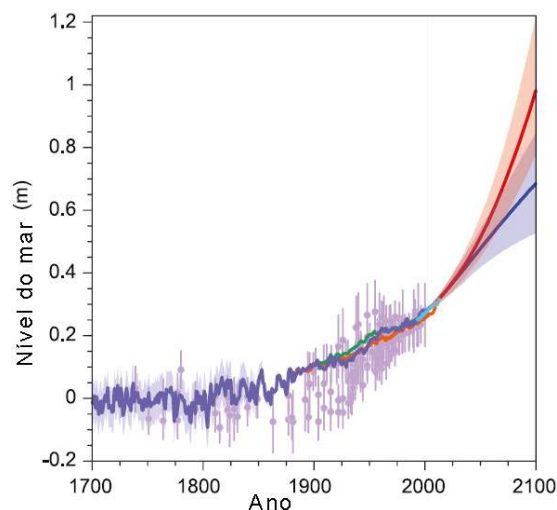
Tal como se pode verificar na tabela 2.2 e na figura 2.13, os próximos cenários que são admitidos para a subida do nível do mar situam-se dentro de horizontes temporais de dezenas a uma centena de anos, ao passo que as adaptações hidromorfológicas de um rio são frequentemente de uma ordem de grandeza superior. Logo, o novo regime de equilíbrio entre os caudais líquidos e sólidos levará normalmente muito mais tempo. Assim, os estudos efectuados no âmbito deste trabalho situam-se dentro de um prazo relativamente curto (100

anos) face à configuração futura do leito do rio determinada pela nova condição de fronteira a jusante.

### 2.3 Subida do nível do mar

Quanto às alterações climáticas, são sempre de esperar algumas surpresas. Mas, a aceleração na subida do nível do mar (*sea level rise* – SLR), que era lenta e agora devido às mudanças globais aumentou de velocidade, é uma certeza para climatologistas e oceanógrafos (Holling, 1994; Oliver-Smith, 2009).

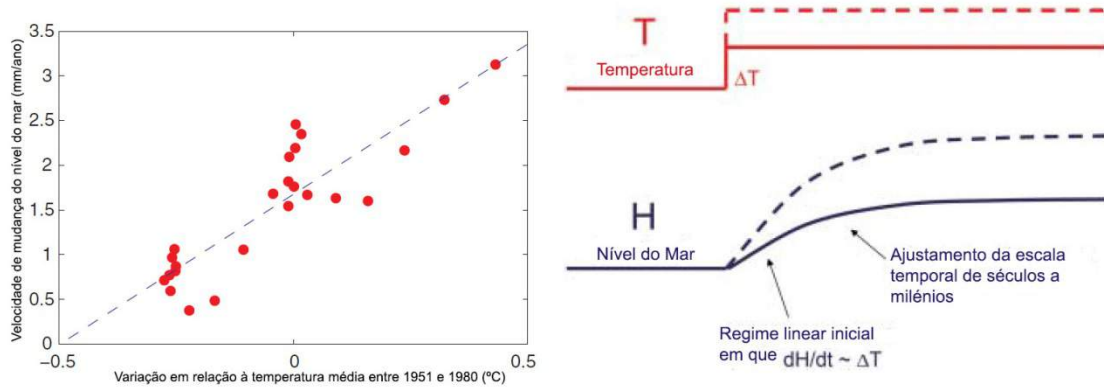
Com efeito o 5º Relatório do IPCC (AR5 – *IPCC Fifth Assessment Report*), indica, em relação ao SLR, que (1) o nível do mar está a aumentar a nível global, (2) o aumento tem vindo a acelerar desde os tempos pré-industriais e (3) irá acelerar ainda mais no século XXI (figura 2.13) (RealClimate, 2013).



**Figura 2.13** SLR no passado e no futuro (IPCC, 2013).

Na origem do SLR, estão as alterações climáticas. Com efeito, a subida do nível do mar é consequência do aquecimento global, nomeadamente das emissões gases efeito estufa e prováveis emissões futuras (figura 2.14) (Greenpeace, 2010).





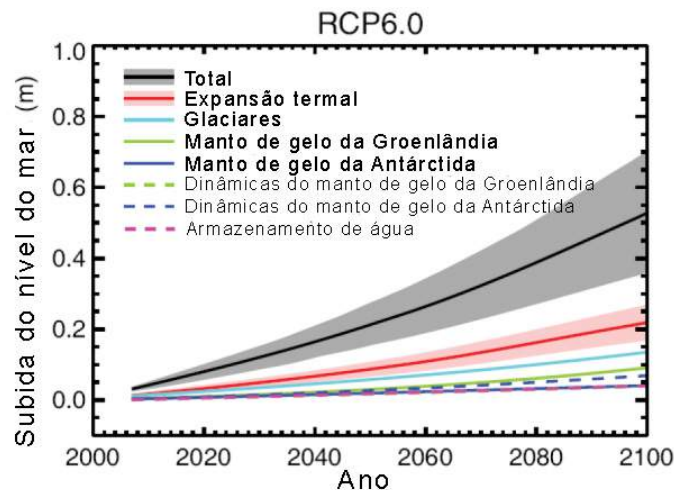
**Figura 2.14** Relação entre o aquecimento global e a subida do nível do mar (Rahmstorf, 2007).

Os dois principais processos físicos que estão na génese da subida do nível do mar são:

- Expansão termal da água devido à captação e penetração de calor nos oceanos;
- Derretimento de glaciares e dos mantos de gelo da Groenlândia e Antárctida.

Ainda não se compreendem por completo estes dois processos e as suas consequências (Oliver-Smith, 2009).

Em particular, no caso do derretimento dos mantos de gelo da Groenlândia e da Antárctida, devido ao aquecimento oceânico e atmosférico, e mudanças na precipitação; o potencial para provocar a subida do nível do mar é elevado, mas este é também o processo para o qual há mais incertezas nas previsões (Rahmstorf, 2007; Stocker, Dahe, Plattner, Tignor, Allen, & Mindgley, 2010).



**Figura 2.15** Previsão de SLR para o cenário RCP6.0 (tabela 2.3) com divisão das contribuições (IPCC, 2013).

As previsões globais para a subida do nível do mar até 2100 são, de acordo com a figura 2.15, para um panorama de elevadas emissões de gases efeito estufa de 1,2 m (limite superior); e, em sentido inverso, para um cenário de significativa redução de emissões de 0,5 m (limite inferior). Contudo, no 5º Relatório do IPCC (2013), os cenários que foram apresentados como sendo mais prováveis de se verificar foram os seguintes:

**Tabela 2.3** SLR até 2100, cenários projectados pelo IPCC no 5º Relatório. Adaptado de (RealClimate, 2013).

Cenário	Média (m)	Intervalo (m)	Limite
RCP2.6	0,44	0,28-0,61	Inferior
RCP4.5	0,53	0,36-0,71	
RCP6.0	0,55	0,38-0,73	
RCP8.5	0,74	0,52-0,98	Superior

De acordo com a tabela 2.3 o intervalo total vai de 0,28 m a 0,98 m. Contudo, o risco de ultrapassar o limite superior de 98 cm é elevado, 17%, e terá lugar se determinados sectores do manto de gelo da Antárctida começarem a derreter, resultando em subidas do nível do mar até 1,2 a 1,5 m (RealClimate, 2013).

As previsões de SLR apresentadas até agora têm carácter global. Porém, na realidade, a subida do nível do mar será distinta consoante o local, porque enquanto que as variações eustáticas têm um carácter global, os movimentos que se verificam no continente são claramente localizados no espaço; e, a variação do nível do mar é a resultante das tendências eustáticas e das tendências que se verificam do lado do continente. Logo, a amplitude do SLR pode aumentar ou reduzir, conforme os movimentos do continente.

Até há pouco tempo o nível do mar era medido relativamente a um ponto que se supunha fixo. O problema é que a pretensa estabilidade dos continentes está cada vez mais posta em causa e, a partir do momento em que se conseguiu fazer observações a partir do espaço, via satélite, foi possível identificar as deformações na superfície do geóide.

O geóide pode ser definido como a superfície equipotencial que seria assumida pela superfície do mar na ausência de marés, variações de densidade da água, correntes e efeitos atmosféricos. Sabe-se hoje que existe um afastamento do geóide relativamente à superfície ideal do elipsóide que pode atingir cerca de 100 m para cima ou para baixo, acabando por conduzir à existência de deformações na superfície do geóide de cerca de 180 m. Este facto é um obstáculo de peso à construção de curvas da variação absoluta do nível do mar, válidas para toda a Terra (Greenpeace, 2010).

Outros factores como a degradação ambiental, a capacidade de adaptação e os níveis de desenvolvimento das localidades, também têm grande influência no SLR em cada região (Oliver-Smith, 2009).

No 5º Relatório, o IPCC fez um mapa mundial das mudanças no nível do mar para o período de 2081 a 2100 relativo ao cenário RCP4.5 da tabela 2.3, que pode ser observado em Anexo I – Figura 4. De acordo com a figura, na costa portuguesa a subida do nível do mar até 2081-2100, poderá variar entre cerca de 0,25 e 0,75 m. Porém, é importante ter em conta que este mapa baseia-se no cenário RCP4.5, isto é, previsões moderadas de SLR.

Vários estudos foram realizados para a projecção do nível do mar na costa portuguesa. Lopes *et al.* (2011), estimou um valor máximo de 0,42 m (antes do 5º Relatório do IPCC que aumentou, de um modo geral, as projecções). Contudo, há pouca investigação dedicada a impactos ao nível dos estuários, em particular no estuário do Mondego. Num trabalho publicado em 2013, foram utilizados para um estudo no estuário do Douro os valores de SLR de 0,28 m, 0,42 m e 1,00 m nos próximos 100 anos (Mendes, Vaz, & Dias, 2013; Lopes, *et al.*, 2011).

É importante fazer previsões de subida do nível médio do mar porque a tendência para a erosão dos continentes e para a sedimentação nos fundos oceânicos tem consequências análogas: um afundamento das bacias oceânicas e um levantamento nos continentes (isostasia devida à erosão).

As áreas claramente subsidentes a nível do globo correspondem a sectores tectonicamente deprimidos que muitas vezes “atraem” cursos de água importantes que aí desaguam, construindo deltas. Por conseguinte, a acumulação de sedimentos que ocorre nestas áreas produz fenómenos de subsidência por isostasia que tendem a perpetuar a acumulação deltaica, que pode assim atingir vários milhares de metros. Porém, se por qualquer motivo a sedimentação deixar de compensar a subsidência (o que pode acontecer devido à construção de barragens, por exemplo), o SLR pode provocar invasões marinha importantes. Portanto, quando à subida do nível médio do mar se associa uma subsidência do continente (deltas, periferia das áreas glaciares e sectores onde a exploração de lençóis freáticos ou de petróleo provoca um abatimento dos terrenos) podem desencadear-se significativas inundações nas zonas costeiras (Greenpeace, 2010).

Consequentemente o SLR é particularmente perigoso para 10% da população mundial, os cerca de 600 a 700 milhões de habitantes do planeta que vivem na LECZ (*Low Elevation Coastal Zone*, 0 a 10 m acima da linha do mar) (Oliver-Smith, 2009).

Os aumentos do nível da água do mar da ordem dos 1,2 a 1,5 m, isto é, os limites máximos, podem significar que locais como as cidades próximas do delta do rio Ganges ou ainda cidades como Nova Iorque, Amsterdão ou Veneza vejam inundadas as suas zonas mais baixas.

As consequências do SLR serão, entre outras (Greenpeace, 2010):

- Inundação de zonas costeiras e de ilhas;
- Erosão de zonas costeiras;
- Contaminação das reservas de água potável por água salgada nas áreas agrícolas;
- Aumento da salinidade nos estuários;
- Risco para os recursos essenciais das populações insulares e costeiras, como a água potável, as pescas, as praias, os recifes de corais e os habitats da vida selvagem;
- Alteração do regime de escoamento e do transporte sólido de cursos de água importantes.

## 2.4 Modelos numéricos de escoamentos em leitos móveis

### 2.4.1 Considerações gerais

A formulação de um problema de Hidráulica Fluvial exige o conhecimento profundo de três diferentes áreas cuja interação não deve ser menosprezada:

1. Formulação matemática
2. Implementação de técnicas numéricas
3. Elaboração de uma estrutura computacional

Esta é a sequência natural de operações na resolução de um problema de Hidráulica recorrendo a um computador, portanto, estas são as fases de elaboração de um modelo de análise computacional, sendo obrigatória a interactividade entre (1), (2) e (3).

A formulação matemática diz respeito às equações que representam os princípios físicos. A implementação de técnicas numéricas tem como objectivo resolver as equações através da discretização. A elaboração de uma estrutura computacional, consiste essencialmente no *software* para resolver as equações obtidas numericamente. Alguns autores, como Tanguy (Tanguy, 2010), acrescentam ainda a disciplina da física, para o auxílio da conceptualização e instrumentação do problema tal como se apresenta na figura 2.16.



**Figura 2.16** Roda virtual da relação entre os processos físicos, matemáticos, numéricos e computacionais. Adaptado de (Tanguy, 2010).

Como se pode verificar nos seguintes exemplos, desde há dois séculos que são aplicados princípios ou modelos matemáticos para a resolução de problemas de Hidráulica Fluvial:

- 1804 – Euler publicou “*Principes généraux du mouvement des fluides*”.
- 1871 – Saint-Venant publicou “*Theory of unsteady waterflow with application to river floods and to propagation of tides in river channels*”.

- 1872 – Boussinesq publicou “*Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d’un canal rectangulaire horizontal*” (Carmo, 2004).

As consequências da intervenção humana e da evolução natural no transporte sólido só podem ser previstas por modelos à escala em laboratório ou por modelos matemáticos. Contudo, a modelação laboratorial não pode simular a grande escala e a longo termo, e nestes casos a única solução é a utilização de um modelo matemático (Cunge, Holly, & Verwey, 1980).

Segundo de Vries (de Vries, 1977), a dinâmica sedimentar é um fenómeno que deveria ser simulado matematicamente e numericamente e ainda usufruir do auxílio da computação, sendo na resolução destas problemáticas, normalmente necessário fazer as seguintes previsões para alcançar respostas:

- i. Previsão do caudal líquido;
- ii. Previsão do caudal sólido;
- iii. Previsão da sedimentação (através da computação morfológica) (de Vries, 1977).

Tal como referido, o caudal sólido e o caudal líquido estão interrelacionados de tal modo que nunca podem ser completamente dissociados. Há muitas fórmulas que expressam a relação destes fenómenos em condições não estáveis, em que a descrição matemática mais simples é sumariada no seguinte esquema de equações (2.11; 2.12; 2.13) (Cunge, Holly, & Verwey, 1980):

Equação da continuidade para a fase líquida do escoamento

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

com,

t – tempo (s)

h – altura da água (m)

u – velocidade média na secção (m/s)

x – distância elementar (m)

Equação dinâmica para a fase líquida do escoamento

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + gs = 0 \quad (2.12)$$

em que,

g – aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>)

z – cota do leito do rio (m)

s – declive da linha de energia (m/m)

Equação da continuidade da fase sólida do escoamento

$$(1 - n)\tilde{b} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

com,

$n$  – porosidade do material do leito (-)

$\tilde{b}$  – espessura da secção transversal afectada pela carga de leito transportado (m)

$G$  – carga sólida transportada em unidade de volume por tempo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Caudal sólido transportado

$$G = G(u, h) \quad (2.14)$$

As equações diferenciais apresentadas ligam as três funções desconhecidas;  $h(x, t)$ ,  $u(x, t)$  e  $z(x, t)$ .

Estas equações são representativas de todos os fenómenos físicos básicos e incorporam uma série de hipóteses no que diz respeito ao caudal líquido e ao transporte sólido.

As equações apresentadas formam um sistema diferencial, parcial e não linear, que necessita de métodos numéricos de integração utilizando computadores para obter soluções (Cunge, Holly, & Verwey, 1980).

## 2.4.2 Modelos matemáticos e numéricos de diferenças finitas utilizados

O modelo computacional desenvolvido neste estudo incluiu a discretização de equações diferenciais ordinárias e com derivadas parciais apresentadas em seguida.

Para o cálculo das condições de escoamento do trecho em estudo foi considerada a situação de escoamentos em regime quase-permanente, tendo sido utilizadas as curvas de regolfo que traduzem o escoamento da superfície livre em canais que transportam caudal líquido constante. O seu cálculo requer a resolução de um problema de valores na fronteira representado pela equação diferencial ordinária de 1ª ordem:

$$\frac{dh}{dx} = \left( \frac{Q^2}{C^2 b^2 h^3} - I \right) \quad (2.15)$$

e com condições de fronteira:  $h(0)$ ;  $h(x)$

em que,

$Q$  – caudal líquido ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$C$  – coeficiente de rugosidade Chézy ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ )

$b$  – largura do fundo do rio (m)

$I$  – declive do fundo do rio (m/m)

$h$  – altura da água (m)

$x$  – distância elementar (m)

Para a sua aproximação numérica utiliza-se um método de Runge-Kutta de 4ª ordem. A ideia fundamental dos métodos de Runge-Kutta aplicados à resolução de uma equação diferencial de 1ª ordem do tipo:

$$\frac{dh}{dx} = f(x, h(x)) \quad (2.16)$$

consiste em evitar o cálculo das derivadas exigidas pelos métodos da série de Taylor aplicados à função  $f(x, h)$  que as torna computacionalmente inaceitáveis.

De um modo geral, os métodos de Runge-Kutta de ordem  $p$  caracterizam-se por:

- a) Possuírem apenas um passo;
- b) Não exigirem o cálculo de qualquer derivada de  $f(x, h)$  e por sua vez utilizam o valor de  $f(x, h)$  em vários pontos;
- c) Terem uma expressão que coincide com a do método da série de Taylor da mesma ordem, após a expansão de  $f(x, h)$  por Taylor para a função de duas variáveis em termos de  $(x_i, h_i)$  e agrupamento dos termos semelhantes.

No caso do método de Runge-Kutta de 4ª ordem aplicado ao cálculo do valor aproximado de  $h$  ( $x$ ) solução da equação (2.16) tem-se:

$$h_{i+1} = h_i + \frac{1}{6}(A_1 + 2A_2 + 2A_3 + A_4) \quad i = 0, 1, \dots \quad (2.17)$$

em que,

$$A_1 = dx \ f(x_i, h_i) \quad i = 0, 1, \dots, N$$

$$A_2 = dx \ f\left(x_i + \frac{dx}{2}, x_i + \frac{A_1}{2}\right) \quad i = 0, 1, \dots, N$$

$$A_3 = dx \ f\left(x_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{A_2}{2}\right) \quad i = 0, 1, \dots, N$$

$$A_4 = dx \ f(x_i + h, x_i + A_3) \quad i = 0, 1, \dots, N$$

No caso concreto das curvas de regolfo  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$  escrevem-se na seguinte forma:

$$A_1 = dx \left( \frac{Q^2}{C^2 b^2 h_i^3} - I \right)$$

$$A_2 = dx \left( h_i + \frac{A_1}{2} \right)$$

$$A_3 = dx \left( h_i + \frac{A_2}{2} \right)$$

$$A_4 = dx (h_i + A_3)$$

$$\text{com } i = 0, 1, \dots, 206$$

Para o cálculo do transporte sólido e das novas cotas de fundo utiliza-se a seguinte equação do balanço de sedimentos:

$$\frac{df}{du} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (2.18)$$

Esta equação com derivadas parciais pode escrever-se na forma:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (2.19)$$

Para a resolver iremos considerar um método numérico de diferenças finitas explícito. Tal como o método de Runge-Kutta já descrito para aproximar uma equação diferencial ordinária de 1ª ordem, os métodos de diferenças finitas também se baseiam no desenvolvimento de Taylor das funções consideradas, que se supõem suficientemente diferenciáveis. De um modo geral as derivadas das funções são aproximadas por diferenças divididas dos seus valores em pontos definidos numa determinada grelha.

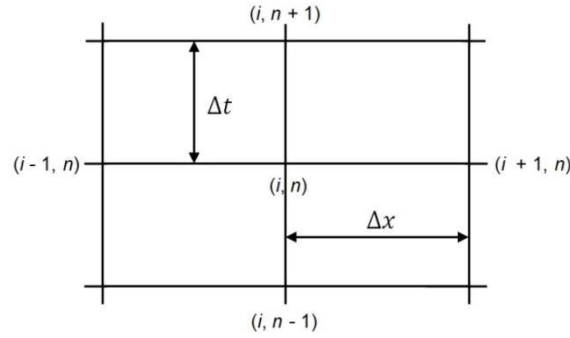
Mais precisamente:

Seja  $z = z(x,t)$  e considere-se que a função  $z$  possui um número suficiente de derivadas parciais. Os valores da função  $z$  nos pontos  $(x,t)$  e  $(x+\Delta x, t+\Delta t)$  estão relacionados pela expressão resultante do desenvolvimento em série de Taylor,

$$\begin{aligned} z(x + \Delta x, t + \Delta t) &= z(x, t) + \left( \Delta x \frac{\partial}{\partial x} + \Delta t \frac{\partial}{\partial t} \right) z(x, t) \\ &+ \frac{1}{2!} \left( \Delta x \frac{\partial}{\partial x} + \Delta t \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 z(x, t) + \dots \\ &+ \frac{1}{(n+1)!} \left( \Delta x \frac{\partial}{\partial x} + \Delta t \frac{\partial}{\partial t} \right)^{n-1} z(x, t) + R_n \end{aligned} \quad (2.20)$$

Consideremos o ponto do espaço  $(i\Delta x, n\Delta t)$ , também designado por nó  $(i, n)$ , da malha de cálculo representada na figura 2.17:





**Figura 2.17** Malha de diferenças finitas. Adaptado de (Carmo, 2004).

Expandindo  $z_{i-1}^n$  e  $z_{i+1}^n$  em série de Taylor em torno do valor de  $z_i^n$  obtém-se:

$$z_{i-1}^n = z_i^n - \Delta x \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 z}{\partial x^3} + \dots \quad (2.21)$$

$$z_{i+1}^n = z_i^n + \Delta x \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \frac{\partial^3 z}{\partial x^3} + \dots \quad (2.22)$$

Considerando agora as equações anteriores, somando e subtraindo uma da outra obtêm-se as seguintes fórmulas de diferenças finitas para as derivadas de primeira e segunda ordem em  $(i, n)$ , segundo a direcção  $i\Delta x$ :

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1}^n - z_i^n}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{Diferenças progressivas}) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_i^n - z_{i-1}^n}{\Delta x} + O(\Delta x) \quad (\text{Diferenças regressivas}) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1}^n - z_{i-1}^n}{2\Delta x} + O[(\Delta x)^2] \quad (\text{Diferenças centradas}) \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{z_{i+1}^n - 2z_i^n + z_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} + O[(\Delta x)^2] \quad (2.26)$$

De igual modo se obteriam as derivadas  $\partial z / \partial t$  e  $\partial^2 z / \partial t^2$ , expandindo  $z_i^{n-1}$  e  $z_i^{n+1}$  em série de Taylor em torno do valor de  $u(i, n)$ , ou seja:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z_i^{n+1} - z_i^n}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (\text{Diferenças progressivas}) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z_i^n - z_i^{n-1}}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (\text{Diferenças regressivas}) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z_i^{n+1} - z_i^{n-1}}{2\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad (\text{Diferenças centradas}) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{z_i^{n+1} - 2z_i^n + z_i^{n-1}}{(2\Delta t)^2} + O[(\Delta t)^2] \quad (2.30)$$

No caso concreto da equação do balanço de sedimentos na forma (2.19) utiliza-se um método de diferenças finitas explícito baseado na aproximação de tipo Lax para  $\partial z / \partial t$  e em diferenças centradas para aproximar  $\partial f / \partial x$  (Quarteroni, 2009).

# Capítulo III – Metodologia e Dados

## 3.1 Breve descrição de alguns modelos de transporte sólido

Os desenvolvimentos da computação automática que se verificaram em meados dos anos 50 do séc. XX, possibilitaram o progresso da modelação numérica computacional aplicada à evolução morfológica de canais naturais (rios) e artificiais (e.g. canais de rega). Neste contexto, em 1967, surgem as primeiras simulações computacionais de transporte sólido, efectuadas por de Vries (de Vries, 1977). Desde então desenvolveram-se muitos modelos de previsão de transporte sólido, o que já por si implica que não existe o “melhor modelo de previsão de transporte sólido”, mas sim, diferentes metodologias, cada uma com os seus méritos (Conde, 2007). Sem pretender ser exaustiva, indica-se de seguida uma lista de alguns modelos computacionais de transporte sólido mais vulgarmente referidos e utilizados em Hidráulica Fluvial.

- HEC-6

O primeiro modelo computacional de evolução morfológica de rios e canais artificiais que obteve notoriedade à escala mundial foi o HEC-6. Desenvolvido nos Estados Unidos pelo *Hydrological Engineering Center* (HEC) do *U. S. Army Corps of Engineers*, este modelo foi criado na década de 70 do séc. XX, sendo desde então actualizado frequentemente e ainda hoje utilizado.

O HEC-6 é um modelo unidimensional (1D) para regime permanente. Contudo, devido à sua notoriedade este modelo é frequentemente aplicado a regimes variáveis. Quando utilizado nestas situações há uma elevada discretização do tempo (para a escala temporal morfológica) de modo a aumentar a estabilidade dos resultados, por exemplo,  $\Delta t = 1$  dia e, consequentemente, há uma alteração diária das condições de fronteira de caudais líquidos e sólidos. Assim, as condições de regime permanente para as quais o modelo foi criado deixam de ser respeitadas, e está ainda por provar a validade de tais extrapolações (Conde, 2007).

- HEC-RAS

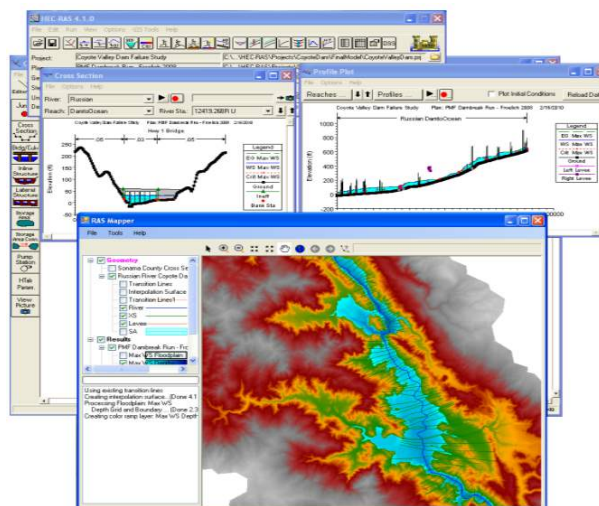
O HEC-RAS é um sucessor do HEC-6 e, tal como este permite a modelação unidimensional (1D) para regime permanente, mas os *softwares* mais recentes, HEC's "Next Generation" (NexGen), também permitem a modelação para regime variável. Este programa pode ser descarregado *online* gratuitamente desde 1995.

Actualmente, está já disponível para teste de qualquer utilizador o HEC-RAS 5.0 Beta que combina modelação unidimensional (1D) e bidimensional (2D) (US Army Corps of Engineers, 2014).

Este *software* possui os seguintes quatro módulos de cálculo hidráulico: (1) curva de regolfo em regime permanente, (2) curva de regolfo em regime não-permanente; (3) transporte sedimentar em fundo móvel, e (4) análise de qualidade da água.

O HEC-RAS resolve as equações de Saint-Venant completas, por aplicação do método das diferenças finitas, permitindo assim simular o escoamento em superfície livre. A lei de resistência aplicada é a equação de Manning-Strickler e a secção transversal de escoamento é considerada uma secção composta. A topografia do canal é caracterizada pelo resultado do levantamento topográfico de uma série de secções transversais ao longo do troço do rio em estudo (Fernandez, Mourato, & Moreira, 2010).

O modelo inclui algumas particularidades, entre as quais a capacidade para fazer um *backup* instantâneo da informação, representando-a por uma interface gráfica (figura 3.1) e conjuntos de tabelas (Conde, 2007).



**Figura 3.1** Exemplo da interface gráfica disponibilizada por uma versão recente do *software* HEC-RAS (HEC-RAS 4.1) (US Army Corps of Engineers, 2014).

- MIKE 11 – HD – ST/SGT

O MIKE 11 é um modelo que disponibiliza variados modos de simulação hidráulica e hidrológica. Tem diversas aplicações ao nível da modelação fluvial, nomeadamente no transporte sedimentar e na avaliação a longo prazo das mudanças na morfologia do rio.

Para a simulação hidrodinâmica de rios o MIKE 11 – HD (HYDRODINAMICS) corre normalmente através de um modelo 1D muito flexível e robusto, que inclui, entre outras capacidades: a solução dinâmica para as equações de Saint-Venant não-lineares quando aplicadas a superfícies livres; a adaptabilidade a estruturas hidráulicas como barragens, pontes, bombas ou tubagens; a variação na simulação de passos de tempo, podendo ser fixos, tabelados ou adaptados; etc.

Vários módulos podem ser acrescentados ao MIKE 11 – HD, permitindo ao utilizador adaptar o modelo às suas necessidades. Um desses módulos é o ST/GTS – NONCOHESIVE SEDIMENT, que tem como finalidade a simulação do transporte, erosão e deposição de sedimentos, incluindo assim simulações das mudanças morfológicas da batimetria do leito do rio (MIKE Powered by DHI technologies, 2014).

- ISIS Sediment Transport (Flood Modeller Pro e ISIS Free)

O Sediment Transport é um módulo de transporte sólido que pode ser adicionado ao modelo ISIS 1D padrão. O ISIS Sediment Transport, está disponível gratuitamente como parte dos produtos Flood Modeller Pro (na sua versão sem custos) e ISIS Free (CH2MHill, 2014).

O módulo de transporte sólido permite obter valores nos nós da malha de diferenças finitas determinando a capacidade de transporte de sedimentos e resolvendo a equação da continuidade de sedimentos para calcular o valor aproximado da erosão/assoreamento em cada ponto da malha. Em seguida, o modelo actualiza as tabelas do canal para permitir calcular assoreamento ou erosão na próxima iteração.

Deste modo, o módulo de transporte de sedimentos inclui seis equações de transporte de sedimentos e consegue prever as taxas de transporte de sedimentos, elevações do leito e quantidades de erosão/sedimentação ao longo de um sistema fluvial. Os valores são conseguidos com o auxílio do modelo hidrodinâmico ISIS 1D para calcular as variáveis hidráulicas de escoamento, altura de água e velocidade em cada passo temporal.

Várias opções estão disponíveis dentro deste módulo, incluindo a especificação de dragagem ou transporte de sedimentos coesivos (CH2MHill, 2014).

Mais alguns modelos de transporte sólido são apresentados num quadro comparativo no Anexo II – Tabela 1.

### 3.2 Justificação e descrição do modelo desenvolvido

O modelo abordado nesta dissertação tem por base um modelo hidráulico e de transporte sólido desenvolvido no Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DCEA – FCT/UNL) e foi gerado com a linguagem de programação Fortran, através da versão Silverfrost FTN 95 (Fortran 95), utilizando o editor de texto Plato. O *input* é preparado num ficheiro DAT onde, em texto, são definidos os dados de entrada da simulação. O *output*, por sua vez, é dado por um ficheiro PLT e um ficheiro OUT (Silverfrost, 2014; Rodrigues A. C., 1986).

As hipóteses de base do modelo são as seguintes: escoamento 1DH (1-D Longitudinal); regime quase-permanente; fluido incompressível; canal com topografia relativamente simples;  $\alpha \approx 0$  ( $\cos \alpha \approx 1$  para declives do fundo pouco acentuados); e, influência do caudal afluente lateral é considerada.

O modelo diferencia-se dos modelos de transporte sólido anteriormente referidos pela sua capacidade de inclusão da subida do nível do mar nos dados de entrada.

Os parâmetros numéricos são o intervalo de tempo  $\Delta t$ , o coeficiente de ponderação no método das diferenças finitas  $\beta$ , o número de iterações para o melhoramento dos coeficientes centrados no tempo e o intervalo espacial DX.

O intervalo de comprimento DX ( $\Delta x$  na equação 3.1) pode ser variável ao longo do canal e a sua escolha irá depender da geometria do sistema em estudo.

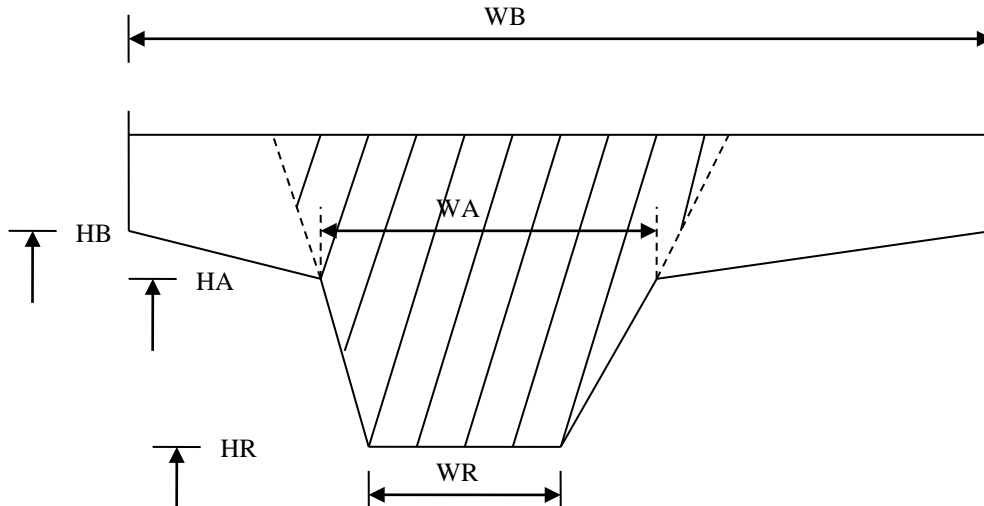
O intervalo de tempo  $\Delta t$  para a simulação calcula-se a partir do número de Courant:

$$Cr = \frac{\Delta t}{\Delta x} \sqrt{gh} \quad (3.1)$$

Para aplicação a escoamentos em estuários, Cr deverá ser de preferência inferior a 5, enquanto que para cálculos de ondas de cheia podem ser usados valores de Cr até 50. Nesta situação considerou-se  $Cr \approx 25$ .

Relativamente aos parâmetros físicos o modelo adopta para o raio hidráulico o valor da altura de água. O declive do fundo é definido a partir das cotas mais baixas (HR – figura 3.2) das secções transversais.

O coeficiente de resistência de Chézy não varia com a altura de água, mas pode variar de ponto para ponto.



**Figura 3.2** Secção transversal tipo (Rodrigues A. C., 1986).

Como é visível na figura 3.2, a secção transversal é caracterizada por três níveis e três larguras: HR (ou ZB) (nível/cota do fundo); HA (nível/cota da margem); HB (nível/cota acima do qual a largura de armazenamento permanece constante); WR (largura do fundo); WA (largura da margem); WB (largura de armazenamento).

Para a realização da simulação começa por se fazer uma selecção do *input* necessário, designadamente os dados gerais, os referentes às secções transversais, às condições de fronteira, aos caudais laterais e às estruturas consideradas. Estes dados estão disponíveis no ficheiro DAT (Anexo II – Exemplo 1), nomeadamente:

- Condições de fronteira – O modelo aceita os dados de fronteira, caudais líquidos (Q), caudais sólidos (S), e alturas de água (H);
- Caudais afluentes laterais – Q e S são especificados como fontes pontuais em funções temporais tabeladas. Um exemplo típico destas funções é apresentado no Anexo II – Figura 2. Poderá haver mais de um afluente lateral num troço do rio.

No que diz respeito às unidades, o intervalo de tempo e a unidade de tempo para as funções podem ser dados em segundos, minutos, horas ou dias. O único requisito é que a mesma unidade de tempo seja usada para todos os dados. Os caudais, no entanto, são sempre dados em  $m^3/s$ .

Já no editor de texto Plato, é definido o limite máximo do nº de secções do trecho em estudo e de afluentes laterais, figura 3.3.

```

DIMENSION A(220),V(220),Q(220),QL(220),
*   WID(220),CHE(220),QSL(220),
*   HQ(220),STAGE(220),SLOPE(219),WRM(219),
*   HR(220),HA(220),WR(220),WA(220),DWDH1(220),DWDH1M(219),
*   BXLQ(220),BFXLQ(220),TFTL(20),QFTL(20),QSFTL(20),
*   SIG(220),CEL(220),FR2(220),SS(220),SQ(220),SED(220),
*   ZB0(220),ZB1(220),ZB2(220),DELTAZ(220),
*   BXL(220),BFXL(220),ALFA(220),CHEM(220),
*   DX(220),DDX(220),PCA(20)
INTEGER TST(20),IM(20),IL(20),LMAX(20),IST,NSTR,TREF,LTIME

```

**Figura 3.3** Exemplo de dimensionamento das matrizes.

Depois, o modelo calcula para o tempo inicial, as cotas de fundo e ainda, os caudais líquidos e sólidos acumulados ao longo das secções tendo em conta os afluentes laterais. Quanto às condições iniciais os valores de Q, S e ZB0 têm de ser conhecidos em todos os pontos da malha, construindo-se uma interpolação linear com o objectivo de reduzir os dados de entrada.

Posteriormente, inicia-se o que foi denominado, Grande Ciclo de Cálculo que é resolvido com:

- Um método de Runge-Kutta de 4ª ordem aplicado às curvas de regolfo, tal como apresentado nas equações de (2.15) a (2.17) para o cálculo de altura de água;
- A equação de Engelund-Hansen (2.10) para o cálculo do transporte sólido total;
- Um método de diferenças finitas explícito baseado na aproximação de tipo Lax para  $\partial z / \partial t$  e em diferenças centradas para aproximar  $\partial f / \partial x$  utilizando as equações (2.19) e (2.29) para a obtenção das novas cotas de fundo.

Concluído o Grande Ciclo de Cálculo, o modelo determina o volume de assoreamento acumulado através da expressão:

$$Asr = Asr + \frac{1}{2} \left( (ZB1(I) - ZB0(I)) \times WR(I) + (ZB1(I+1) - ZB0(I+1)) \times WR(I+1) \right) \times DX(I) \quad (3.2)$$

Os resultados finais presentes nos ficheiros *output* disponibilizam, no ficheiro PLT todos os perfis transversais considerados e para cada um deles as distâncias à origem, a cota de fundo inicial ZB0, a cota de fundo final ZB1, a superfície livre final WL e ΔZB. No ficheiro OUT teremos as alturas de água H, as superfícies livres WL, as cotas de fundo ZB, o ΔZB e o caudal sólido S. Neste ficheiro (OUT) todos os dados estarão disponíveis em cada passo de tempo considerado, e é ainda fornecido o volume de assoreamento para o tempo total da simulação.



### 3.3 Dados de entrada – *Input*

#### 3.3.1 Dados geométricos

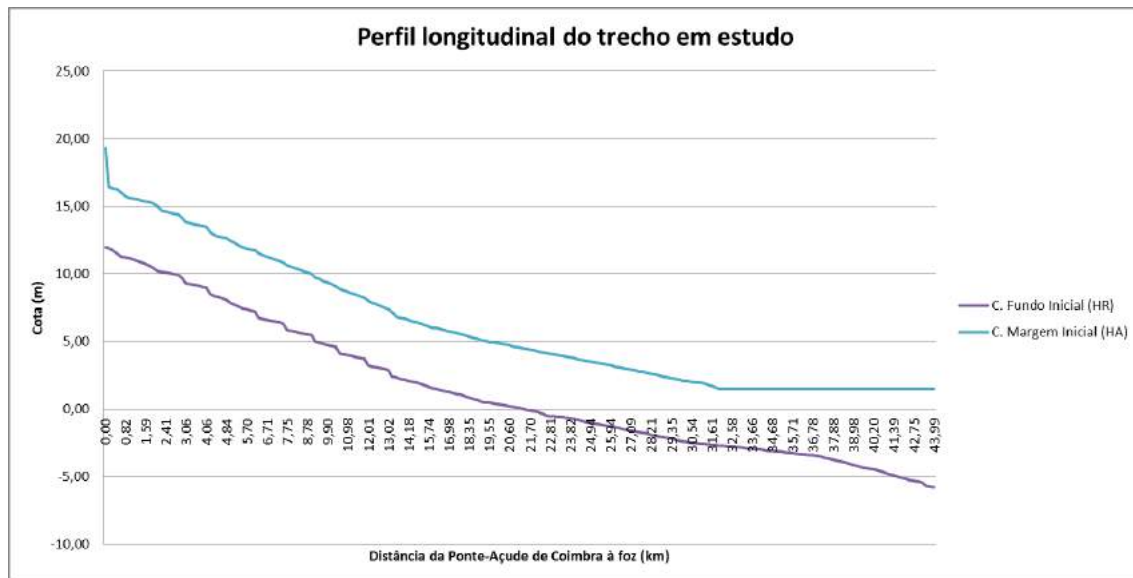
A informação relativa a levantamentos do leito do rio Mondego, a jusante do Açude-Ponte de Coimbra, foi disponibilizada em formato digital. Parte dessa informação provém dos levantamentos realizados pela Hidroprojecto (Hidroprojecto, 1977) (até aos 37 km), os restantes 7 km foram obtidos a partir do ortofotomapa da zona e por extrapolação. Com base nas diferenças geométricas identificadas através dos dados fornecidos e estimados, foram definidas 206 secções no trecho em estudo (tabela 3.1) (Anexo II – Exemplo 1).

**Tabela 3.1** Dados de entrada geométricos considerados no modelo.

Secção	HR (m)	HA (m)	WR (m)	WA (m)	DX (m)	Chézy (m <sup>1/2</sup> /s)
1 a 177	Levantamentos da Hidroprojecto					40,00
178 a 206	Estimativas			Ortofotomapa <sup>2</sup>		

- Perfil longitudinal

Tendo em vista a obtenção do perfil longitudinal, foram atribuídas cotas de fundo (HR) e cotas de margem (HA) para os 44 km do trecho em estudo (figura 3.4).



**Figura 3.4** Perfil longitudinal inicial com alturas de água.

Considerando o perfil apresentado e a figura 2.3 (secção 2.1), pode-se dividir o trecho em estudo em 3 troços de acordo com o declive de fundo (tabela 3.2):

<sup>2</sup> Anexo II – Figura 1.

**Tabela 3.2** Delimitação e características longitudinais do trecho em estudo.

	Distância (km)			Secção (J)		Declive do fundo (I)
	De	a	Total	De	a	
<b>Troço 1</b>	0,00	13,25	13,25	1	72	0,00071
<b>Troço 2</b>	13,25	37,01	23,76	72	177	0,00025
<b>Troço 3</b>	37,01	43,99	6,99	177	206	0,00033

Relativamente ao Troço 1, verifica-se uma inclinação mais elevada devido às 11 estruturas existentes (soleiras de fixação do fundo com desnível), observáveis na figura 3.4. Cada uma destas estruturas foi concebida por forma a provocar no escoamento perdas de carga de,  $i = 0,25$  m e, consequentemente deu origem a um declive de fundo  $I = 0,00833$  em 11 das 35 secções, elevando a média do declive da cota de fundo deste troço.

Com base nas figuras 3.4 e 2.3 (secção 2.1), pode-se também dividir o Troço 2 em relação à inclinação do fundo:

**Tabela 3.3** Delimitação e características longitudinais do Troço 2.

	Distância (km)			Secção (J)		Declive do fundo (I)
	De	a	Total	De	a	
<b>Troço 2.1</b>	13,25	22,61	9,36	72	110	0,00030
<b>Troço 2.2</b>	22,61	31,00	8,39	110	148	0,00026
<b>Troço 2.3</b>	31,00	37,01	6,01	148	177	0,00015

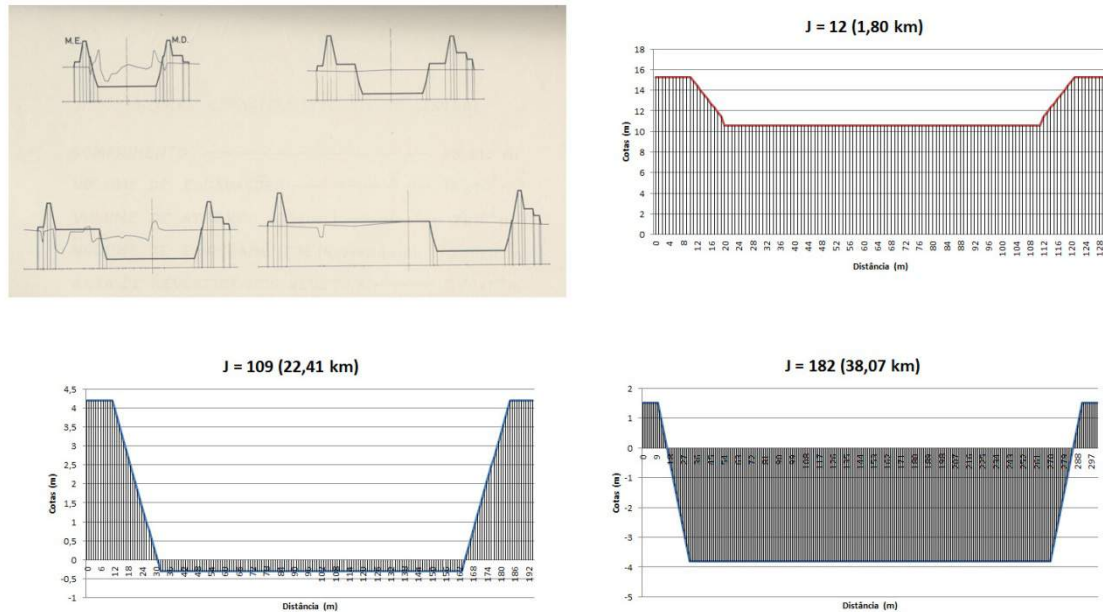
Quanto ao Troço 3 trata-se da zona de estuário (braço Norte), aqui vão-se verificar maiores alturas de água, entre 5 e 10 m em situação maré alta (secção 2.1.2). Assim, estimou-se a cota de fundo tendo em conta este facto, obtendo para  $J = 206$ , uma altura de água de 5,78 m, através da expressão (3.3):

$$HA = (I * (DX \times 2) - HR_{J-1}) \times (-1) \quad (3.3)$$

- Secções transversais

Tal como foi referido, tendo em vista a obtenção das secções transversais do trecho em estudo, incluindo a largura do fundo e a largura da margem foram considerados os dados dos últimos levantamentos da Hidroprojecto até aos 37 km e a partir daí, o WA foi obtido pelo ortofotomapa (Anexo II – Figura 1) e o WR por estimativa através da expressão:

$$WR = WA - 6 \times (HA - HR) \quad (3.4)$$



**Figura 3.5** Secções transversais do troço em estudo; J = 12 e J = 109 secções com dados disponibilizados (Baixo Mondego), J = 108 secção com dados estimados (braço Norte); (em cima à esquerda) secções transversais projectadas pela Hidroprojecto (Hidroprojecto, 1986).

### 3.3.2 Dados hidráulicos: caudais líquidos, sólidos e alturas de água

#### Dados na fronteira de montante:

- Caudal líquido,  $Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$
- Caudal sólido,  $S$  (varia consoante o cenário)

#### Dados na fronteira de jusante:

- Altura de água,  $H = 0 \text{ m}$

No modelo desenvolvido apenas se pode atribuir um valor ao caudal líquido e sólido de montante em  $t = 0$  ( $Q$  e  $S$  dados na fronteira de montante). Por conseguinte, foi atribuído o mesmo valor de caudal líquido para todos os cenários simulados e foram realizados dois conjuntos de simulações no que se refere ao caudal sólido. Os valores considerados foram:

- $Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $=Q_D$ ); optou-se pelo caudal dominante atribuído ao rio Mondego por se tratar do valor de escoamento mais relevante para a análise da evolução da morfologia do fundo do rio (secção 2.2.4). O canal em estudo foi projectado para a cheia centenária em Coimbra de  $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$  (figura 2.6) e o valor de caudal médio registado mais recentemente na Açude-Ponte de Coimbra é de  $97 \text{ m}^3/\text{s}$  (Anexo II – Figura 4). Mas, como o rio apresenta um regime pluvial e torrencial/semi-torrencial, isto é, o intervalo de variação de escoamentos é muito grande, inclusive apresentando grandes variações interanuais (Anexo II – Figura 5), a melhor solução encontrada foi a de optar exclusivamente pelo caudal dominante (Anexo II – Tabela 1).

- $S = 1,5$  l/s; valor de caudal sólido médio para o qual as obras de regularização foram projectadas;
- $S = 3,0$  l/s; apesar do caudal sólido projectado ser o referido anteriormente, antes das obras o  $S$  médio registado em Coimbra era de 7,5 l/s e, como a retenção das partículas é um processo gradual e não imediato, optou-se por atribuir este valor intermédio de caudal sólido (Anexo II – Tabela 2).

Foram ainda considerados os caudais líquidos e sólidos dos 6 principais afluentes laterais: rio Ançã, ribeira de Cernache, rio Ega, rio Arunca, rio Foja e rio Pranto. A variabilidade interanual registada para os afluentes ao rio Mondego é semelhante à da linha de água principal, por isso, optou-se novamente pelo valor do caudal dominante de cada afluente para os caudais líquidos (ARH Centro, 2011). Os valores de  $Q$  e  $S$  afluentes foram atribuídos com base em dados registados pela Hidroprojecto (Hidroprojecto, 1977), aquando da realização de trabalhos de campo com vista à execução das obras de regularização fluvial (Anexo II – Tabela 3).

Relativamente ao braço Norte sabe-se que evidencia grande hidrodinâmica e fortes variações anuais ao nível do escoamento, e a capacidade de transporte sólido varia praticamente de valores nulos até valores da ordem de 0,9 l/s (Ribeiro, 2001).

### 3.3.3 Material sólido de fundo

O modelo desenvolvido permite a atribuição de um único valor para o diâmetro. Por conseguinte, optou-se por simular dois tipos de cenários no que se refere ao tamanho médio das partículas (*Medium Grainsize* – MG):

- $MG = 0,0026$  m; cascalho fino segundo a escala de Atterberg (tabela 2.1). O valor registado para o diâmetro médio ( $D_{50}$ ) no Açude-Ponte de Coimbra;
- $MG = 0,0022$  m; cascalho fino (limite inferior) de acordo com a escala de Atterberg. Foi também utilizado este diâmetro porque, como foi referido na secção 2.2.2, o tamanho das partículas diminui de montante para jusante do rio e este valor foi registado ( $D_{50} = 0,0022$  m) em Vila Pouca (10 km a jusante do Açude-Ponte Coimbra). Portanto, em regra, nos primeiros 10 km do trecho em análise, as partículas do fundo do leito variam entre areia grosseira e cascalho fino (Ferreira & Cunha, 1970).

Importa também referir que o estuário do Mondego é predominantemente arenoso, com granulometrias de areia fina a grosseira (0,063 a 2 mm) (Ribeiro, 2001).

Na decisão do tamanho médio dos sedimentos a simular é relevante ter em conta que a equação de Engelund-Hansen deve apenas ser aplicada para o cálculo do transporte sólido de diâmetros correspondentes a areias e cascalhos, não devendo ser atribuído a  $D_{50}$  um valor inferior a 0,15 mm ( $\approx$  média de areia fina) (Cunge, Holly, & Verwey, 1980).

Não foram realizadas simulações com outros valores de MG, nomeadamente valores inferiores uma vez que, apesar de ser um factor com relevância para a evolução do fundo móvel, é o que revela menos influência de entre os *inputs* a que foram atribuídos valores que variam nas simulações.

#### 3.3.4 Subida do nível do mar

Foram atribuídos os seguintes valores para a subida do nível do mar nos próximos 100 anos (2015 a 2115): 4 mm/ano; 6 mm/ano; 8 mm/ano; 10 mm/ano; e, 12 mm/ano.

Os SLR mencionados tiveram como base a informação referente à subida do nível do mar disponível na secção 2.3 da dissertação. Assim, optou-se por 4 mm/ano para limite mínimo, prevendo uma subida do mar de 0,4 m, por se tratar de um valor próximo da média do limite mínimo estimado pelo IPCC (44 cm) e do valor de subida do nível do mar previsto por Lopes *et al.* (2011) para a costa portuguesa. Por outro lado, seleccionou-se 12 mm/ano para limite máximo, com o objectivo de considerar um valor de SLR que tenha em conta os panoramas mais prejudiciais de alterações climáticas e consequente aceleração da subida do nível médio do mar. Não se optou por 15 mm/ano, o valor mais extremo de todos os previstos, devido à sua reduzida probabilidade de acontecimento na costa portuguesa local onde, segundo o IPCC, não se espera a ocorrência de qualquer dos limites máximos dos intervalos definidos para cada cenário (tabela 2.3).

As subidas do nível do mar de 6 mm/ano, 8 mm/ano e 10 mm/ano, são assim valores intermédios entre os dois SLR anteriormente referidos. De acordo com as previsões do IPCC, 6 mm/ano e 8 mm/ano são as subidas de nível do mar mais prováveis na costa portuguesa. Optou-se também por fazer um conjunto de simulações com SLR = 10 mm/ano por se tratar de um valor próximo do limite superior dos principais cenários do IPCC (98 cm), e também por ter sido o limite máximo num estudo realizado no estuário do Douro em 2013 (Mendes, Vaz, & Dias, 2013).

No Anexo II – Exemplo 1, é apresentado o padrão de dados de entrada das simulações realizadas.



# Capítulo IV – Aplicação do modelo e Análise de resultados

## 4.1 Calibração do modelo

Todos os modelos numéricos necessitam de calibração para melhorar o seu desempenho, de modo a compensar erros que se verifiquem nos dados de entrada e em algumas simplificações na formulação. O objectivo é aproximar o modelo o máximo possível da realidade prevista (Fernandez, Mourato, & Moreira, 2010). Como tal, antes de se proceder à simulação dos diferentes cenários, entendeu-se que seria útil realizar previamente testes de calibração para obter confiança nos resultados do modelo.

Pese embora não se poder efectivamente realizar uma calibração matemática no verdadeiro sentido, pois na realidade não é possível comparar os resultados do modelo com a realidade, entendeu-se no entanto proceder a alguns testes de “aferição” do modelo para se poder avaliar a sua robustez numérica e confiança.

Por isso, foram seleccionadas quatro situações “estereotipadas”, relativas a cenários cujos resultados têm uma solução qualitativa conhecida. O comportamento do modelo para estes cenários mostrou-se essencial para avaliar a confiança na aplicação do modelo.

### 4.1.1 Dados de entrada – *Input* dos testes de calibração

Foram efectuados 4 testes de calibração, com os seguintes dados de entrada:

#### Dados gerais

- Secções de  $J = 1$  a  $J = 201$
- Simulação de 8 784 espaços de tempo de 1,00 unidades (1 Ano)
- Simulação de 87 840 espaços de tempo de 1,00 unidades (10 Anos)
- Simulação de 878 400 espaços de tempo de 1,00 unidades (100 Anos)
- *Output* a cada 720 passos de tempo
- Coeficiente de precisão no esquema diferencial ( $\alpha$ ) = 0,001
- Aceleração da gravidade =  $9,81 \text{ m/s}^2$
- N° de afluentes laterais = 6 (todos com Q e S nulos)
- N° de estruturas = 0
- Tamanho médio dos sedimentos = 0,0026 m

- Porosidade = 0,30
- Subida do nível do mar (SLR) = Varia consoante o teste

#### Unidades

- Níveis em  $m$
- Caudais em  $m^3/s$
- Tempo em  $h$

#### Dados das secções

**Tabela 4.1** Dados das secções.<sup>3</sup>

Secção	HR (m)	HA (m)	WR (m)	WA (m)	Chézy ( $m^{1/2}/s$ )	DX (m)
1	12,00	17,00	100,00	120,00	40,00	200,00
201	0,00	7,00	100,00	120,00	40,00	1,00

#### Dados na fronteira de montante

- Caudal líquido,  $Q = 340 \text{ m}^3/s$
- Caudal sólido,  $S$  (varia consoante o teste)

#### Dados na fronteira de jusante

- Altura de água,  $H = 2,89 \text{ m}$  (em  $\Delta t = 0$ )

### 4.1.2 Testes de calibração

Nos testes de calibração efectuados foram obtidos os resultados apresentados em seguida.

→ Regime uniforme

*Input:*

$S = 0,0095 \text{ m}^3/s$

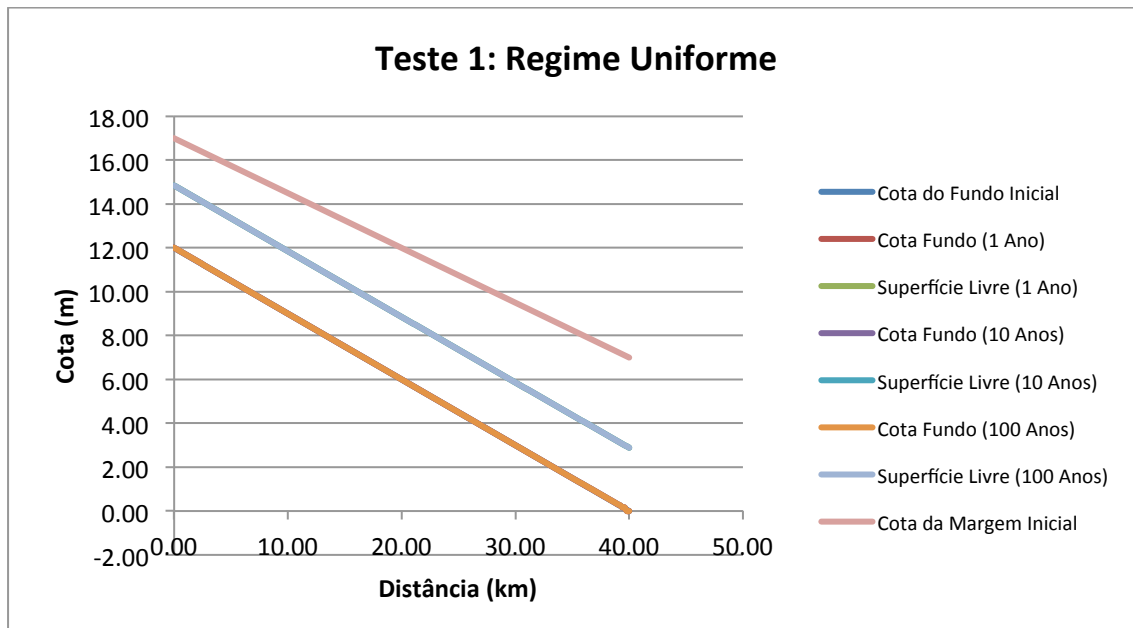
SLR = 0 mm/ano

No 1º Teste considerou-se um regime uniforme, onde o caudal sólido é igual à capacidade de transporte sólido e assim, através da equação de Engelund-Hansen (2.10), foi obtido o valor  $S = 0,0095 \text{ m}^3/s$ . Num regime uniforme a altura de água e a velocidade de escoamento (entre outros parâmetros) não variam ao longo do canal. Por conseguinte, as linhas do fundo e de superfície livre serão paralelas.

<sup>3</sup> HR (cota do fundo inicial) diminui 0,06 m entre cada secção  
 HA (cota da margem inicial) diminui 0,05 m entre cada secção  
 DX = 200 m em todas as secções (excepto J=201); 40 km no total



Output:



**Figura 4.1** 1º Teste de calibração. Regime uniforme.

Assoreamento (1 ano) = 1 452 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 254 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 2 254 m<sup>3</sup>

Como se pode verificar no gráfico da figura 4.1 o *output* de valores relativos às cotas de fundo e superfície livre são os expectáveis para um regime uniforme, ou seja, um movimento cujas características hidráulicas em cada secção não variam com o tempo, e em que a diferença de nível dos planos de água a montante e a jusante do trecho se mantém constante.

Relativamente aos dados de saída deste teste de calibração é de salientar que:

- Se obtém um gráfico com cotas de fundo iniciais e cotas de fundo para 1 ano, 10 anos e 100 anos coincidentes;
- Os níveis de superfície livre para 1 ano, 10 anos e 100 anos são também coincidentes;
- As cotas de fundo ( $I = 0,00030$ ) e de superfície livre ( $I = 0,00029$ ) definem curvas aproximadamente paralelas entre si, e a altura de água média para 1 ano, 10 anos e 100 anos ao longo do perfil longitudinal de 40 km é sempre igual a 2,86 m;
- Nas simulações para 1 ano, 10 anos e 100 anos, aos 40 km,  $H = 2,89$  m e  $WL = 2,89$  m, isto porque no modelo desenvolvido, ao ser considerado um  $SLR = 0$  mm/ano, o último km do trecho modelado irá sempre assumir uma  $ZB1 = 0$  m e a  $WL$  irá ser igual ao nível atribuído à altura de água nos dados da fronteira de jusante ( $H = 2,89$  m);
- Quanto ao assoreamento, verifica-se algum ruído entre 1 ano e 10 anos, com um pequeno volume de 802 m<sup>3</sup>. Contudo, entre 10 e 100 anos o valor manteve-se, confirmando a fiabilidade do modelo, pois tratam-se dos valores expectáveis para um regime uniforme; o valor de 2 254 m<sup>3</sup> ao fim de 100 anos, que teoricamente deveria ser

nulo neste teste, representa na realidade um valor residual face ao volume anual de transporte sólido (0,76%);

- O *output* de cotas de fundo secção a secção para as três simulações, permite verificar que até à distância de 39,2 km só existem pequenos volumes de assoreamento pontuais. Contudo, nos últimos 800 m da simulação há um pequeno volume de erosão (desprezável) que indica algum ruído nas simulações, devido ao valor nulo atribuído a SLR.

→ Caudal sólido nulo

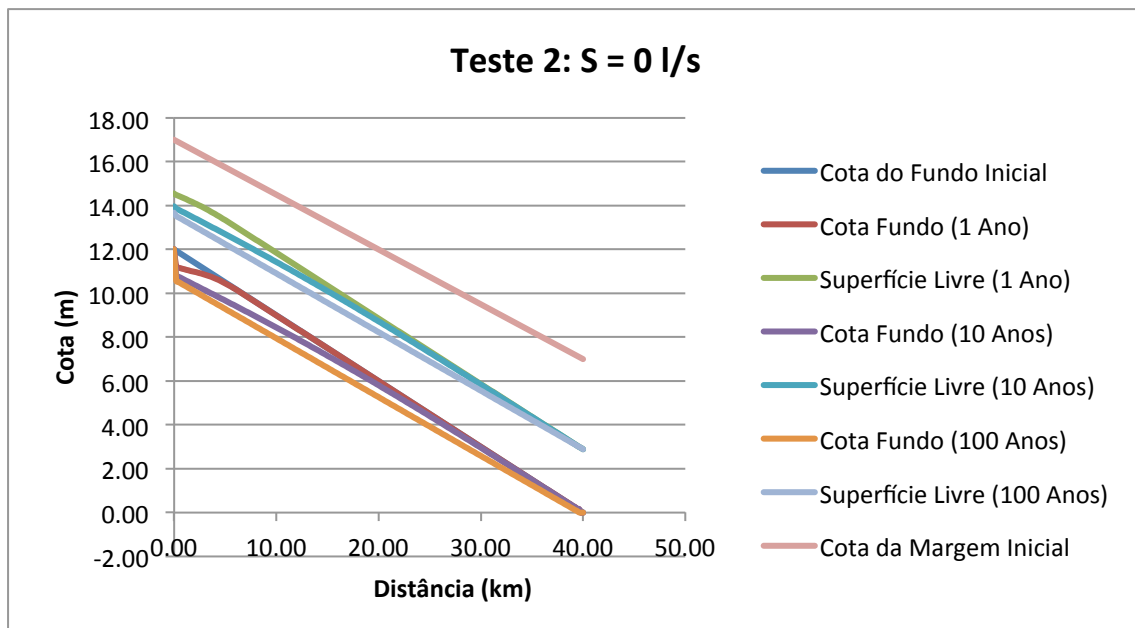
*Input:*

$$S = 0 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{SLR} = 0 \text{ mm/ano}$$

Na simulação computacional do comportamento morfodinâmico de um rio a longo prazo, em que se considera o caudal sólido como sendo nulo, tanto a cota do fundo como a superfície livre têm tendência a baixar. Logo, para o assoreamento prevê-se um valor negativo, isto é, haverá erosão, generalizada e crescente.

*Output:*



**Figura 4.2** 2º Teste de calibração. Caudal sólido =  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$\text{Assoreamento (1 ano)} = - 181\,300 \text{ m}^3$$

$$\text{Assoreamento (10 anos)} = - 1\,301\,552 \text{ m}^3$$

$$\text{Assoreamento (100 anos)} = - 2\,915\,606 \text{ m}^3$$

Alguns factos a realçar são:

- As cotas de fundo para 1 ano, 10 anos e 100 anos apresentam um abaixamento significativo entre 0 e 200 m ( $J = 1$  e  $J = 2$ ), de -1,37 m para 100 anos, -1,13 para 10 anos e -0,74 m para 1 ano;
- As cotas de fundo iniciais e as cotas de fundo para 1 ano são praticamente coincidentes, excepto nos primeiros 6 km de distância da simulação, acentuando o pequeno erro referido no ponto anterior;
- As cotas de superfície livre para 1 e 10 anos são quase coincidentes a partir da distância 29,6 km até 40 km, coincidindo também com as cotas dos 100 anos aproximadamente desde os 39 km;
- Na distância de 0 km ( $J = 1$ ) os níveis da superfície livre para 10 anos (13,97 m) e 100 anos (13,67 m) estão mais próximos do que para 1 ano (14,54 m). Até à distância de 8,2 km WL (10 anos) e WL (100 anos) estão sempre mais próximas, a partir daí até ao fim do perfil são as cotas para 1 e 10 anos que se aproximam;
- A altura média da água na simulação toma valores cada vez maiores  $H_{\text{média}}$  (1 ano) = 2,89 m,  $H_{\text{média}}$  (10 anos) = 2,93 m e  $H_{\text{média}}$  (100 anos) = 2,96 m. Os valores mais elevados de  $H$  para 1 ano registam-se em  $J = 2$ , pelas razões referidas no primeiro ponto ( $H_{\text{máx}} = 3,06$  m). Para 10 anos os valores mantêm-se aproximadamente constantes entre  $J = 2$  e  $J = 24$ , diminuindo depois até aos 40 km; e, para os 100 anos, os valores são sempre mais ou menos constantes a partir dos 200 m, dentro da média  $H = 2,93$  m. Comparando as alturas de água de 1 e 10 anos, cerca dos 22 km, o  $H$  fica quase constante e portanto, as cotas de WL e ZB1 das simulações para 1 e 10 anos formam curvas praticamente paralelas (entre ZB e WL) e coincidentes (ZB, 1 e 10 anos; WL, 1 e 10 anos) tal como se pode verificar na figura 4.2; as simulações para 10 e 100 anos também apresentam alturas de água próximas ao longo do perfil, mas os valores só coincidem nos últimos 400 m;
- Na distância de 0 km as cotas de fundo são inferiores às do 1º Teste e na distância de 40 km são iguais, constatando-se que o declive das curvas é menor no 2º Teste;
- Tanto ZB1 como WL tomam valores iguais para as três simulações na distância de 40 km, isto porque foi considerado um SLR nulo tal como no 1º Teste (Regime uniforme).
- Para 1 ano, o modelo previu erosão até aos 12,4 km, para 10 anos até 34,6 km e para 100 anos ao longo de todo o perfil.

→ Duplicação do caudal sólido de regime permanente

*Input:*

$$S = 0,019 \text{ m}^3/\text{s}$$

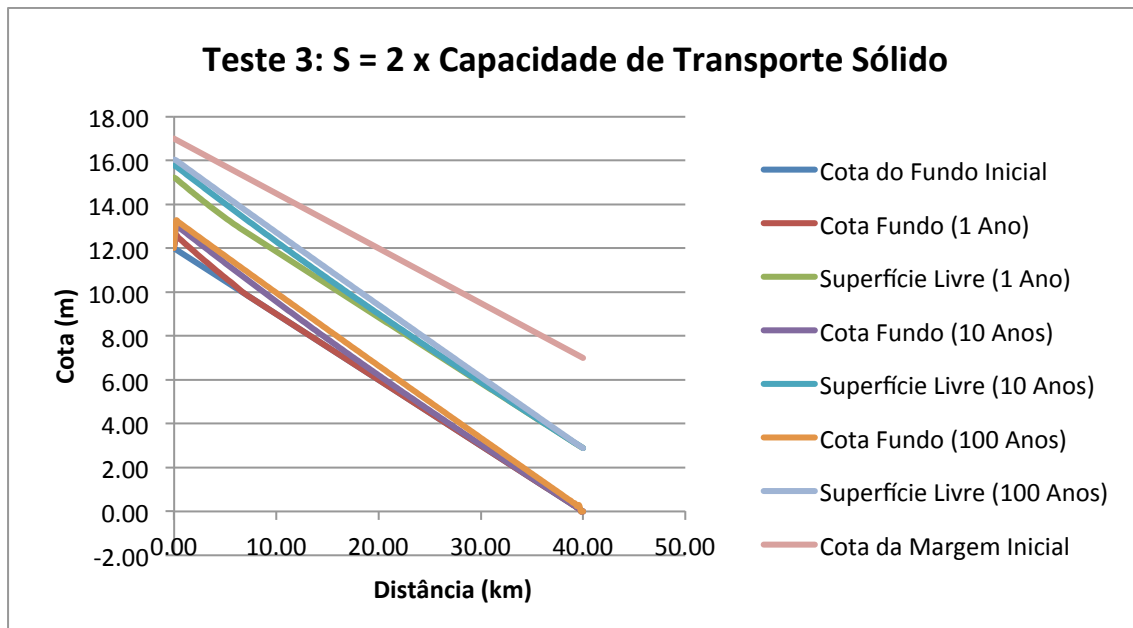
$$\text{SLR} = 0 \text{ mm/ano}$$

O 3º Teste distingue-se do 1º Teste (Regime uniforme) por considerar que o escoamento sólido é o dobro da capacidade de transporte sólido. Para obter o  $S$  deste teste de calibração, foi

considerado o valor calculado para a capacidade de transporte sólido, através da equação de Engelund-Hansen,  $S = 0,0095 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tendo em conta o elevado valor atribuído ao caudal sólido, espera-se que todos os anos as cotas de fundo e superfície livre subam, sendo também previsível a longo prazo um volume significativo de assoreamento.

*Output:*



**Figura 4.3** 3º Teste de calibração. Caudal sólido = 2 x capacidade de transporte sólido.

Assoreamento (1 ano) =  $204\,560 \text{ m}^3$

Assoreamento (10 anos) =  $1\,330\,828 \text{ m}^3$

Assoreamento (100 anos) =  $2\,653\,967 \text{ m}^3$

De seguida, são feitas algumas observações com base no *output* deste teste:

- As cotas de fundo para 1 ano, 10 anos e 100 anos apresentam uma subida significativa entre as distâncias 0 e 200 m; 1,33 m para 100 anos, 1,11 m para 10 anos e 0,64 m para 1 ano;
- As cotas de fundo iniciais e as cotas de fundo para 1 ano são praticamente coincidentes a partir de 7,2 km até aos 40 km, havendo algum ruído entre os 39,4 km e 40 km, dificilmente observáveis no gráfico da figura 4.3;
- Comparando as cotas de fundo para 1 e 10 anos, são superiores as cotas para a simulação de 10 anos e, no gráfico da figura 4.3 é observável que até aos 2,7 km a tendência é para o aumento da diferença entre os valores de ZB1 (1 ano) e ZB1 (10 anos), depois a distância começa a diminuir. Em todas as simulações deste 3º Teste as cotas de fundo ZB1 acabam por coincidir com as cotas de fundo iniciais ZB0, ZB1 (1 ano) a partir dos 7 km, ZB1 (10 anos) aproximadamente a partir dos 34 km e ZB1 (100 anos) apenas nos últimos 400 m;

- Os níveis de superfície livre para 1 ano e 10 anos são praticamente coincidentes a partir da distância de 31,2 km até 40 km, e são coincidentes com as cotas dos 100 anos aproximadamente desde os 39 km, tal como se verificou no 2º Teste (Caudal sólido nulo);
- Na distância de 0 km os níveis de superfície livre para 100 anos (16,05 m) e 10 anos (15,77 m) estão mais próximos do que para 1 ano (15,23 m), até cerca dos 11 km as cotas da superfície livre para 10 e 100 anos estão sempre mais próximas e formam curvas quase paralelas até aos 21 km, voltando depois a aproximar-se. Quanto aos níveis da superfície livre para 1 e 10 anos, ficam mais próximos desde os 5,2 km, a partir desta distância estão sempre a aproximar-se até que aos 31,2 km ficam quase coincidentes;
- As alturas de água aos 0 km são progressivamente maiores, na simulação para 1 ano (3,23 m), 10 anos (3,77 m) e 100 anos (4,05 m), como se pode depreender das observações feitas no primeiro ponto e no ponto anterior. Os valores mais altos de H registam-se sempre na primeira secção e a altura média da água tem tendência a diminuir a longo prazo:  $H_{\text{média}} (1 \text{ ano}) = 2,83 \text{ m}$ ,  $H_{\text{média}} (10 \text{ anos}) = 2,79 \text{ m}$  e  $H_{\text{média}} (100 \text{ anos}) = 2,77 \text{ m}$ ;
- Comparando H (1 ano) e H (10 anos), a partir da distância de 27,4 km o seu valor é quase constante, e portanto os níveis de ZB1 e WL das simulações para 1 e 10 anos formam curvas praticamente paralelas. As simulações para 10 e 100 anos também apresentam alturas de água semelhantes entre 9,2 km e 21,4 km, ou seja, nesta distância as cotas de fundo e superfície livre são também paralelas (figura 4.3);
- Tal como se verificou no 1º e 2º Testes, tanto as cotas de fundo como as de superfície livre coincidem para a distância de 40 km, confirmando a necessidade de dar um valor ao parâmetro SLR;
- Os valores de assoreamento obtidos neste teste foram muito elevados tal como esperado, sendo quase simétricos dos valores verificados no 2º Teste. Para 1 ano, o modelo previu assoreamento até aos 7 km, para 10 anos até 34 km e para 100 anos ao longo de todo o perfil, havendo uma pequena erosão nos últimos 400 m, indicando erro nas secções de fronteira do modelo, J = 199 e J = 200, resultante de SLR = 0 mm/ano.

→ Subida do nível do mar a jusante

*Input:*

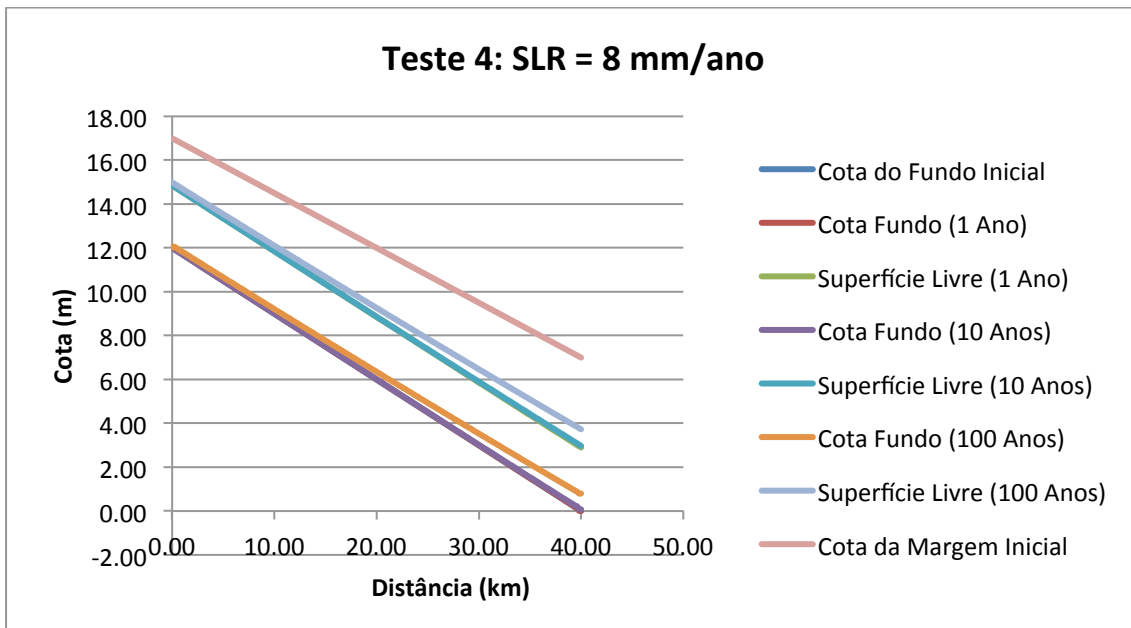
$$Q = 340 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 0,0095 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{SLR} = 8 \text{ mm/ano}$$

O 4º Teste de calibração distingue-se dos restantes por ser o único que atribui um valor não nulo ao parâmetro da subida do nível do mar.

Output:



**Figura 4.4** 4º Teste de calibração. SLR = 8 mm/ano.

Assoreamento (1 ano) = 3 667 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 55 031 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 1 516 644 m<sup>3</sup>

Tal como se pode verificar no gráfico da figura 4.4 o *output* de valores relativos às cotas de fundo e superfície livre são os expectáveis qualitativamente, pois este é o único dos 4 gráficos em que na distância de 40 km as cotas entre simulações são distintas. Confirmando, assim, a validade do modelo desenvolvido.

Quanto aos dados de saída deste teste de calibração, salienta-se:

- As cotas de fundo ZB1 (1 ano), ZB1 (10 anos), ZB1 (100 anos) e os níveis de superfície livre WL (1 ano), WL (10 anos) e WL (100 anos) descrevem praticamente rectas;
- As cotas de fundo e de superfície livre para 100 anos apresentam um declive menor quando comparadas com as de 1 ano e 10 anos, pelo que com a subida do nível médio do mar se prevê que a longo prazo a inclinação do perfil longitudinal tenha tendência a diminuir devido, naturalmente, ao assoreamento;
- As cotas de fundo médias foram  $ZB1_{média}$  (1 ano) = 6,00 m,  $ZB1_{média}$  (10 anos) = 6,01 m e  $ZB1_{média}$  (100 anos) = 6,38 m, mostrando uma propensão para o seu aumento em função do tempo;
- Os níveis de superfície livre médios foram  $WL_{média}$  (1 ano) = 8,86 m,  $WL_{média}$  (10 anos) = 8,88 m e  $WL_{média}$  (100 anos) = 9,30 m, indicando a mesma tendência que para as cotas de fundo;

- As alturas médias de água foram  $H_{\text{média}} (1 \text{ ano}) = 2,86 \text{ m}$ ,  $H_{\text{média}} (10 \text{ anos}) = 2,86 \text{ m}$  e  $H_{\text{média}} (100 \text{ anos}) = 2,92 \text{ m}$ , demonstrando que, com a subida do nível do mar, também se prevê a subida do nível do rio a longo prazo;
- É com a subida do nível do mar que há maiores diferenças a nível de volume de assoreamento ao longo do tempo, mas no 3º Teste (Duplicação do caudal sólido de regime permanente) registou-se um valor de assoreamento maior para os 100 anos;

Os 4 testes realizados produziram resultados expectáveis face às situações teóricas que representavam, o que veio reforçar a confiança na utilização do modelo através da sua consistência e robustez.

Todos os testes efectuados, em particular o 4º Teste, revelaram valores muito aproximados entre as simulações para 1 ano e 10 anos. Assim, a análise da evolução do leito aluvionar do trecho do Baixo Mondego foi realizada tendo como principal foco as simulações para 100 anos.

## 4.2 Simulações no trecho

Os resultados obtidos através do modelo desenvolvido, quando aplicado ao Baixo Mondego, são agora apresentados e analisados.

Neste estudo da resposta do fundo móvel a diferentes previsões de subida do nível do mar para os próximos 100 anos, foram considerados 20 Cenários (tabela 4.2).

**Tabela 4.2** Dados de entrada que distinguem os 20 cenários simulados e valor atribuído ao caudal líquido (caudal dominante), agrupados por subida do nível do mar.

Cenário	S	SLR	Q (=Q <sub>d</sub> )	MG
	m <sup>3</sup> /s	mm/ano	m <sup>3</sup> /s	m
C1	0,0015	4	340	0,0022
C2	0,0030	4	340	0,0026
C3	0,0015	4	340	0,0026
C4	0,0030	4	340	0,0022
C5	0,0015	6	340	0,0022
C6	0,0030	6	340	0,0026
C7	0,0015	6	340	0,0026
C8	0,0030	6	340	0,0022
C9	0,0015	8	340	0,0022
C10	0,0030	8	340	0,0026
C11	0,0015	8	340	0,0026
C12	0,0030	8	340	0,0022
C13	0,0015	10	340	0,0022
C14	0,0030	10	340	0,0026
C15	0,0015	10	340	0,0026
C16	0,0030	10	340	0,0022
C17	0,0015	12	340	0,0022
C18	0,0030	12	340	0,0026
C19	0,0015	12	340	0,0026
C20	0,0030	12	340	0,0022

Todo o *input* não mencionado na tabela 4.2 já foi referido na secção 3.3 desta dissertação. Quanto aos dados gerais, os únicos parâmetros que variam são o tamanho médio dos sedimentos, dentro dos valores referidos na secção 3.3.3 (MG = 0,0022 m e MG = 0,0026 m), e o SLR. Relativamente às unidades das simulações no trecho, são iguais às dos testes de calibração (secção 4.1). Os dados das secções (J), por sua vez, já foram descritos no Capítulo 3, secção 3.3.1. Por fim, os dados na fronteira de jusante e montante, já haviam sido mencionados na secção 3.3.2, e tal como se pode observar na tabela 4.2 o único destes dados a que é atribuído um valor distinto consoante o cenário é o caudal sólido a jusante (S = 0,0015 m<sup>3</sup>/s e 0,0030 m<sup>3</sup>/s).

#### 4.2.1 Dados de saída – *Output*

O *output* apresentado foi dividido por conjuntos de cenários com o mesmo dado de entrada de subida do nível do mar.

Os volumes de assoreamento mencionados nesta secção referem-se a volume de assoreamento + volume de erosão, mas são denominados apenas de assoreamento porque em termos de balanço de volumes ocorreu assoreamento.



Nas figuras da evolução dos perfis longitudinais nos próximos 100 anos (2015 a 2115) não estão representadas as cotas de fundo e superfície livre correspondentes a 1 ano, para facilitar a leitura dos gráficos. Para 1 ano registaram-se valores muito semelhantes aos das simulações para 10 anos, gerando curvas quase coincidentes.

Todos os gráficos de perfil longitudinal apresentados de seguida (secção 4.2.1.1 a 4.2.1.5), permitem, tal como foi constatado em 3.3.1, observar o seguinte em relação às cotas de fundo iniciais:

- As 11 estruturas, nomeadamente, soleiras de fixação de fundo com perda de carga de 0,25 m, desde a distância de 0 km até aproximadamente 13 km;
- O início da zona de estuário, a partir de cerca de 37 km do perfil longitudinal, pois há um acentuado aumento do declive da cota de fundo;
- Um constante abaixamento da cota de fundo ao longo do trecho de montante para jusante, com o valor do declive do fundo,  $I = 0,00037$  (Anexo III – Tabela 1).

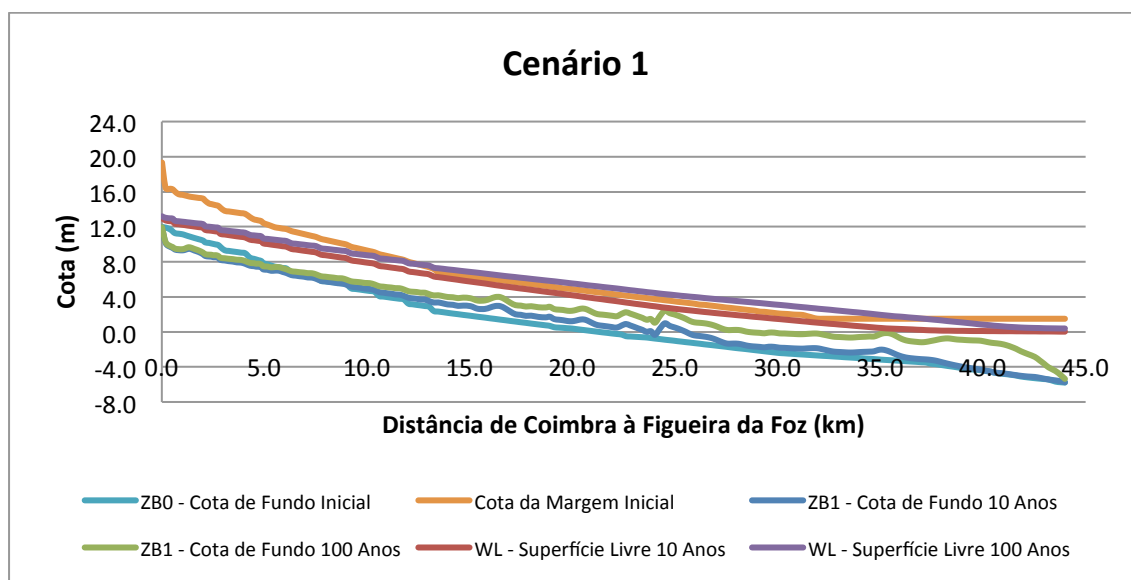
#### 4.2.1.1 Cenários com SLR = 4 mm/ano

→ Cenário 1

Assoreamento (1 ano) = 161 598 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 036 793 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 213 198 m<sup>3</sup>



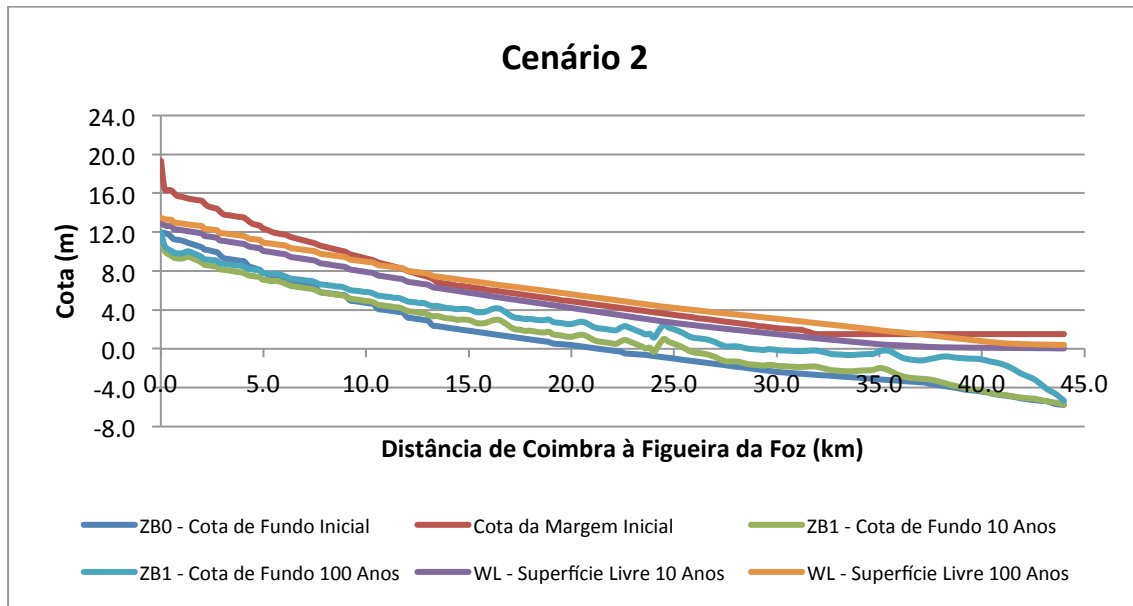
**Figura 4.5** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 1.

→ Cenário 2

Assoreamento (1 ano) = 163 128 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 069 409 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 534 894 m<sup>3</sup>



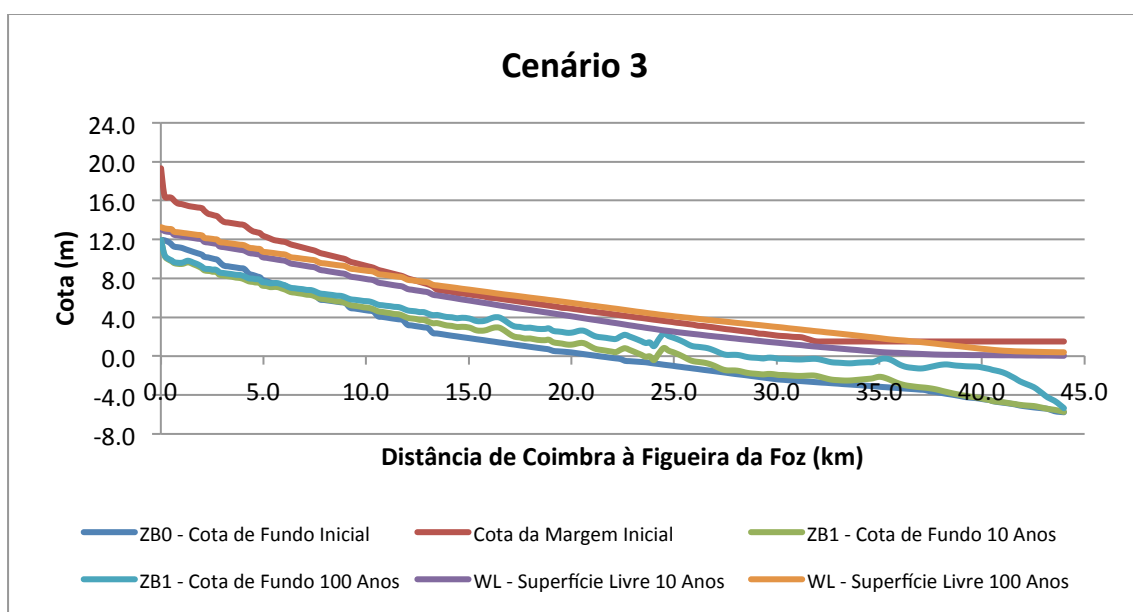
**Figura 4.6** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 2.

→ Cenário 3

Assoreamento (1 ano) = 152 862 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 1 849 887 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 9 900 399 m<sup>3</sup>



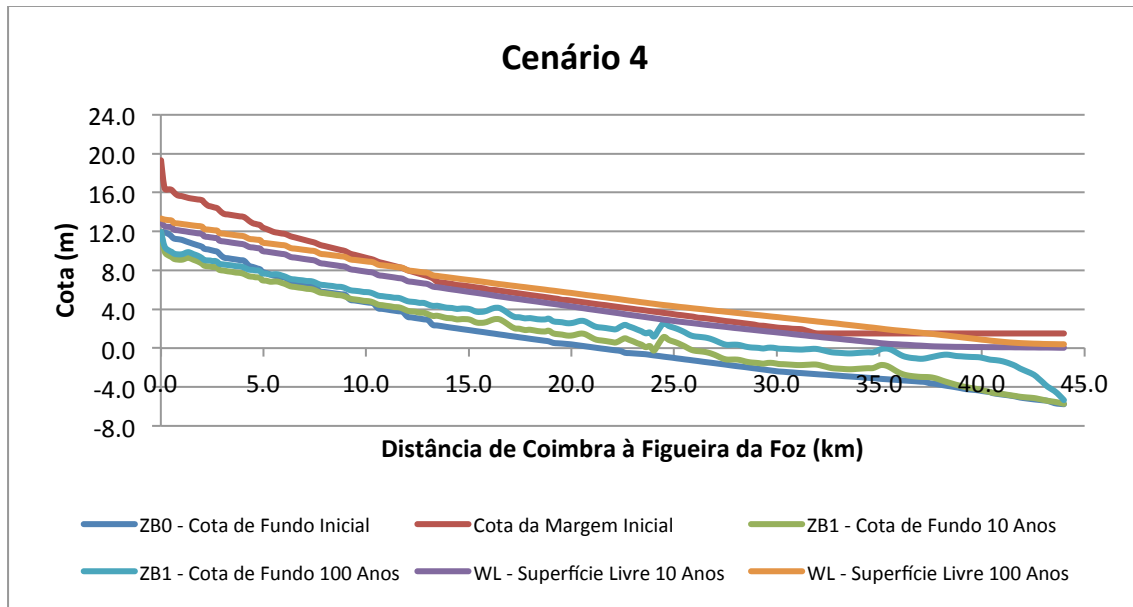
**Figura 4.7** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 3.

→ Cenário 4

Assoreamento (1 ano) = 173 966 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 278 833 m<sup>3</sup>

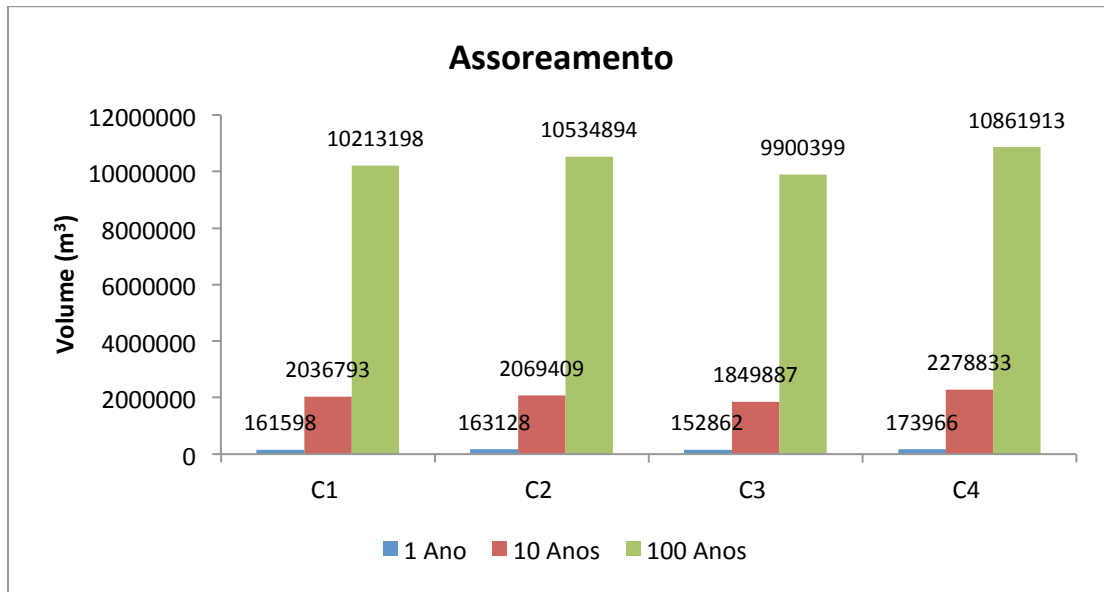
Assoreamento (100 anos) = 10 861 913 m<sup>3</sup>



**Figura 4.8** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 4.

Todos os perfis longitudinais resultantes das cotas de fundo e superfície livre obtidas nas simulações de SLR = 4 mm/ano em 100 anos, podem ser observados no mesmo gráfico, no Anexo III – Figura 1.

No gráfico de barras da figura 4.9 estão representados todos os assoreamentos mencionados anteriormente. Neste é possível observar que o volume de assoreamento apresenta para 1, 10 e 100 anos sempre a seguinte ordem decrescente: C4, C2, C1 e C3. Também se pode constatar que as diferenças quantitativas entre volume de assoreamento para cada cenário se vão acentuando com o passar dos anos, contudo se tivermos em conta o nível de grandeza, as diferenças entre volumes mantêm-se semelhantes. Outro facto que fica bastante claro nesta figura é que, na simulação para 10 anos a taxa de assoreamento é superior. Mais sobre este tema será mencionado em 4.2.3.



**Figura 4.9** Comparação de assoreamentos, SLR = 4 mm/ano.

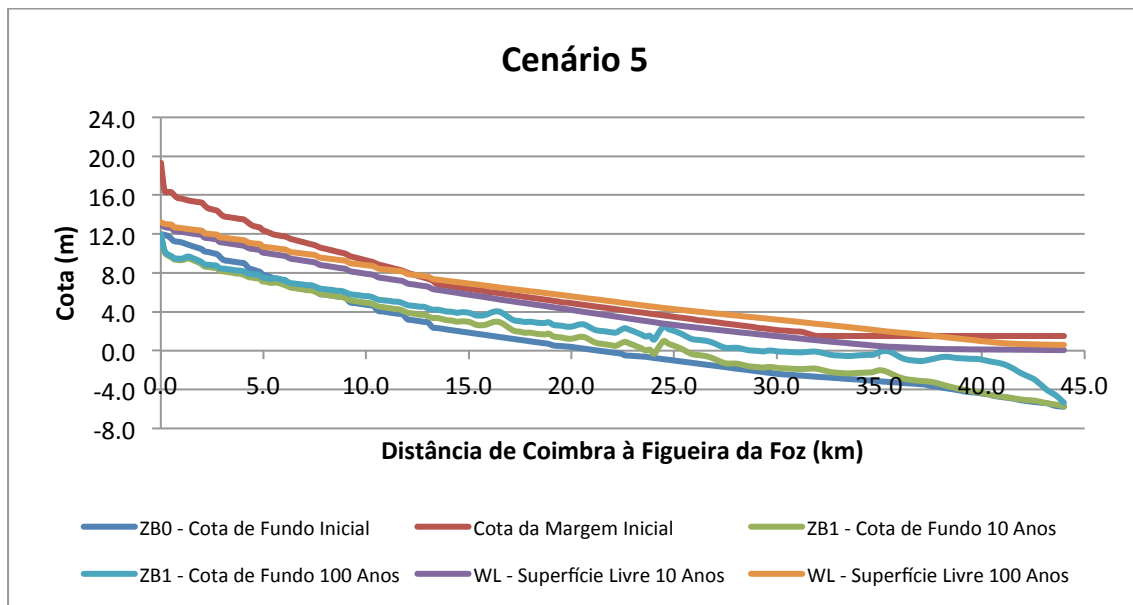
#### 4.2.1.2 Cenários com SLR = 6 mm/ano

→ Cenário 5

Assoreamento (1 ano) = 161 611 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 038 913 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 490 848 m<sup>3</sup>



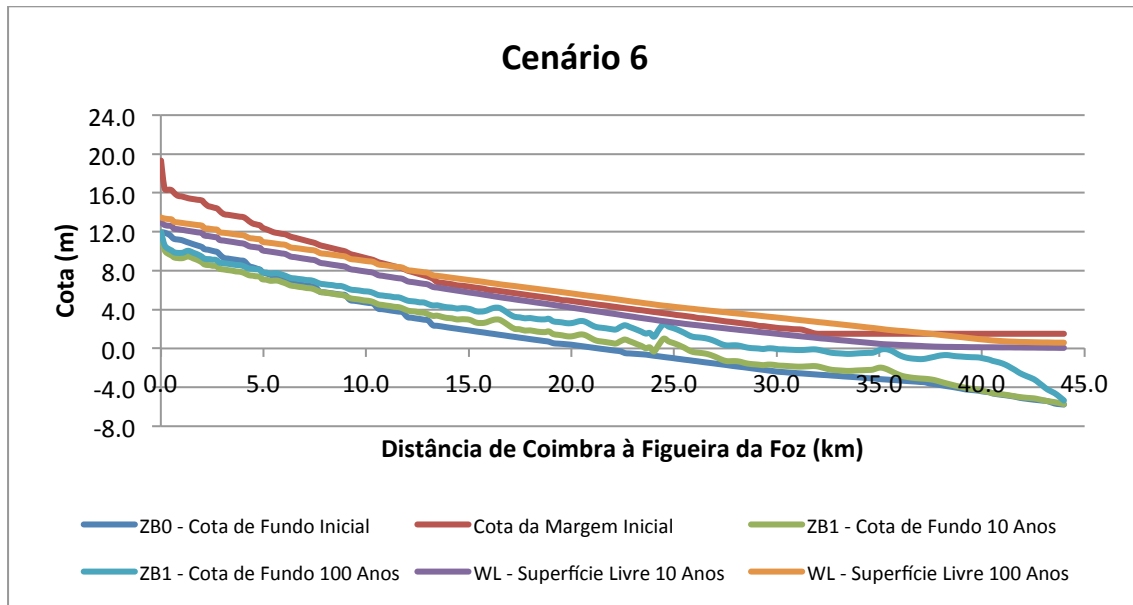
**Figura 4.10** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 5.

→ Cenário 6

Assoreamento (1 ano) = 163 149 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 071 413 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 807 725 m<sup>3</sup>



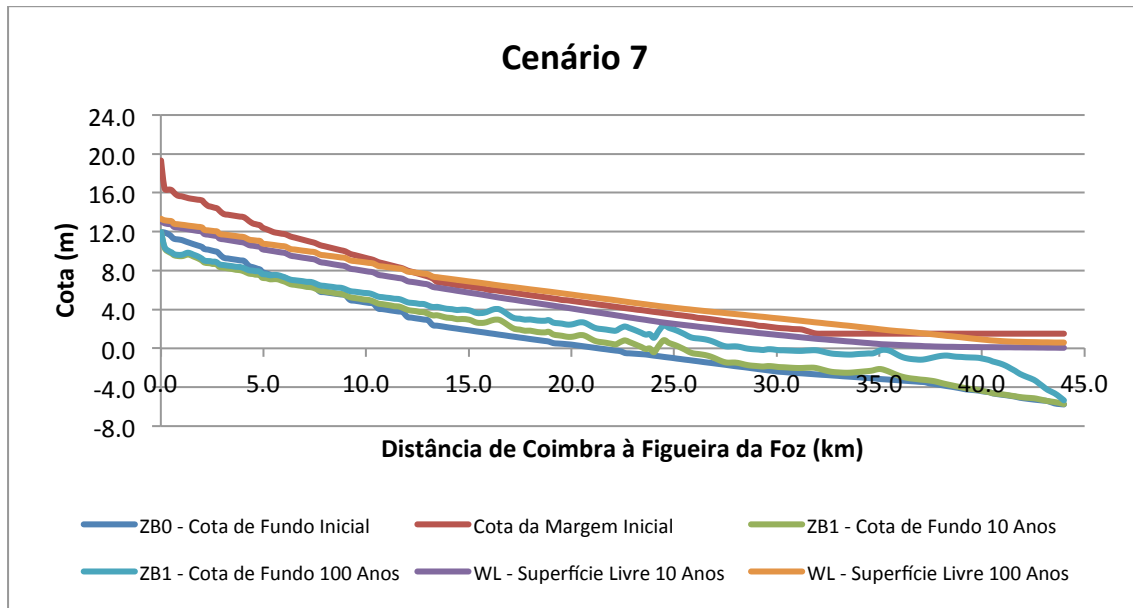
**Figura 4.11** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 6.

→ Cenário 7

Assoreamento (1 ano) = 152 885 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 1 851 731 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 171 562 m<sup>3</sup>



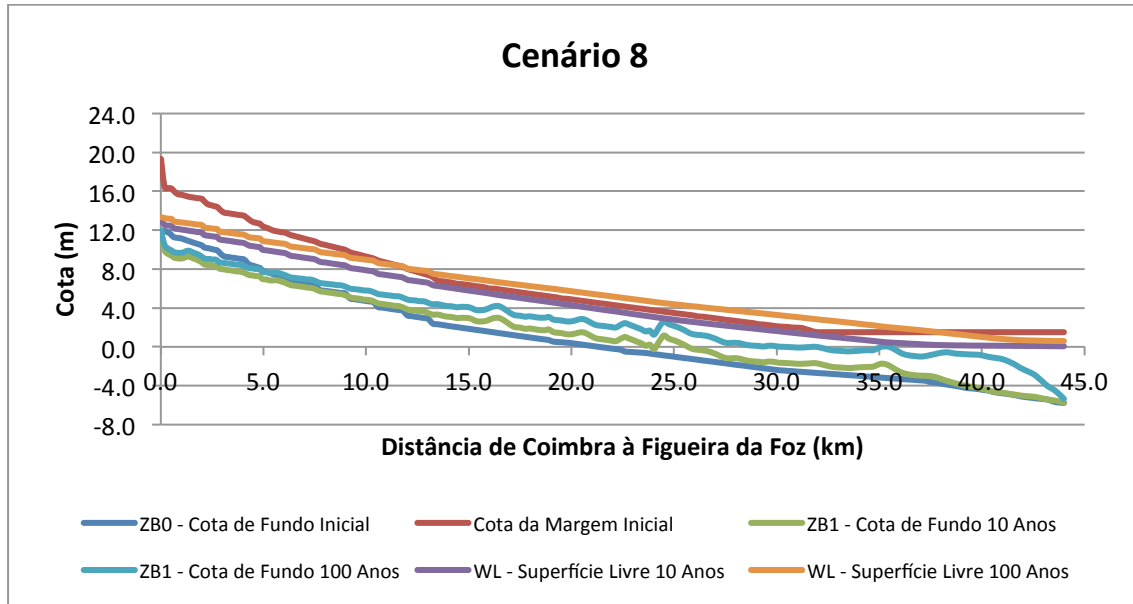
**Figura 4.12** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 7.

→ Cenário 8

Assoreamento (1 ano) = 173 978 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 280 902 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 139 095 m<sup>3</sup>

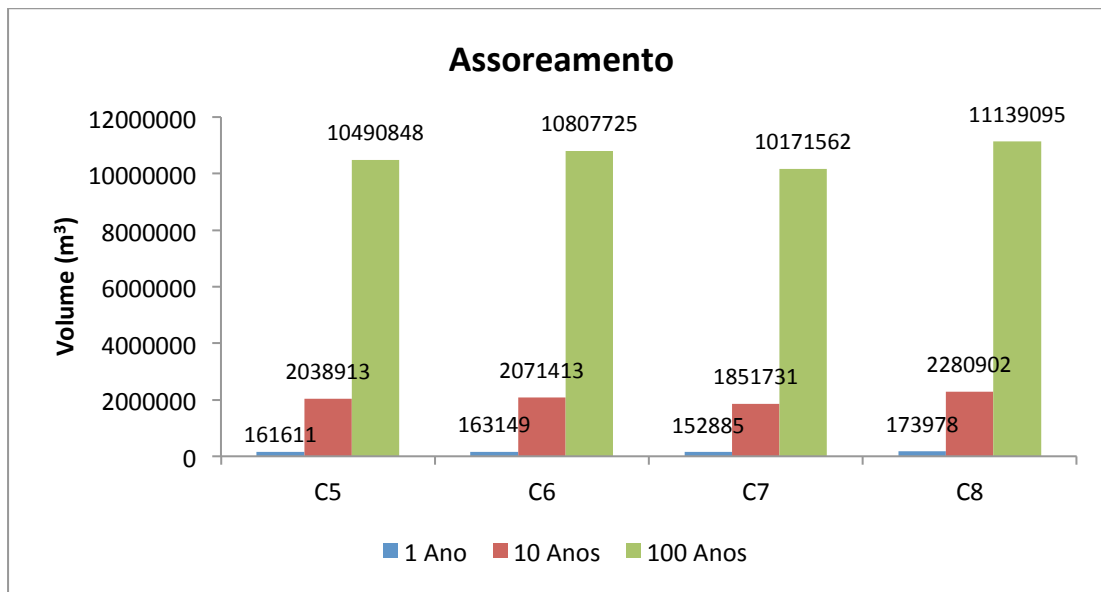


**Figura 4.13** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 8.

O Anexo III – Figura 2 apresenta um gráfico com os perfis longitudinais deste conjunto de cenários, para as simulações de 100 anos.

Na figura 4.14 estão representados todos os volumes de assoreamento mencionados para SLR = 6 mm/ano. Constata-se que o volume para 1, 10 e 100 anos tem sempre a seguinte ordem

decrecente: C8, C6, C5 e C7. Todos os factos referidos anteriormente para o gráfico de barras da figura 4.9 também podem ser aqui observados. O assoreamento é analisado com mais pormenor na secção 4.2.3.



**Figura 4.14** Comparação de assoreamentos, SLR = 6 mm/ano.

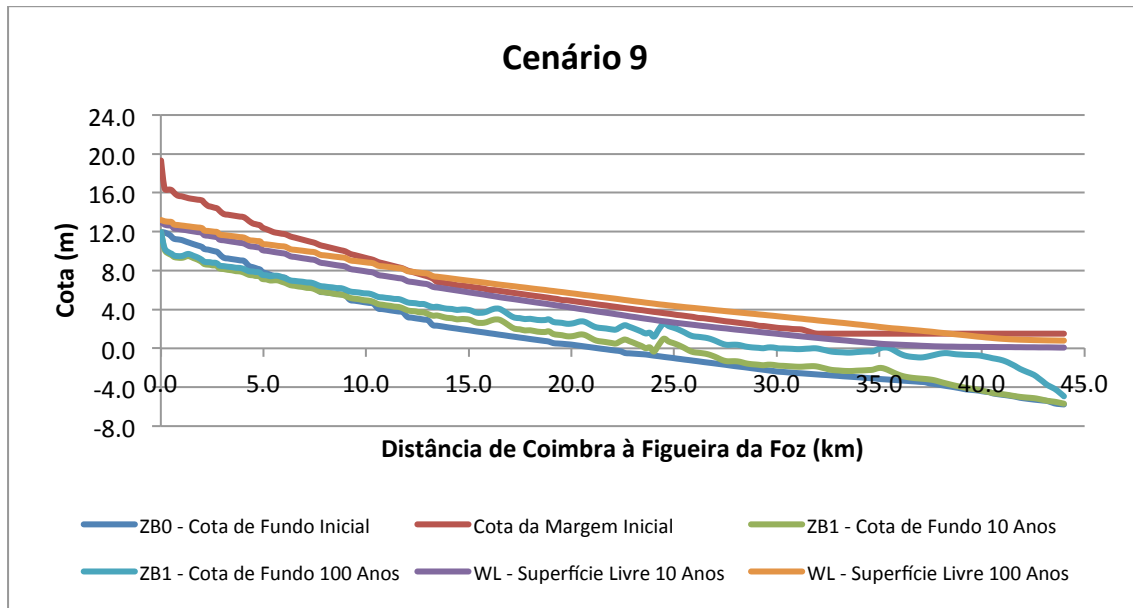
#### 4.2.1.3 Cenários com SLR = 8 mm/ano

→ Cenário 9

Assoreamento (1 ano) = 161 944 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 052 765 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 986 663 m<sup>3</sup>



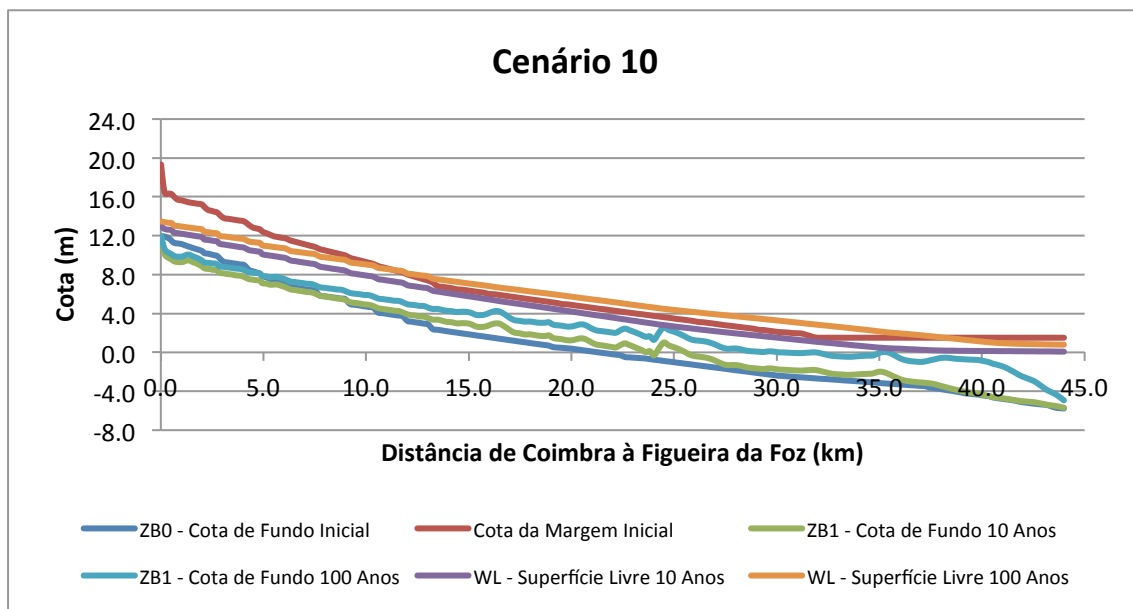
**Figura 4.15** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 9.

→ Cenário 10

Assoreamento (1 ano) = 163 490 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 084 766 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 294 925 m<sup>3</sup>



**Figura 4.16** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 10.

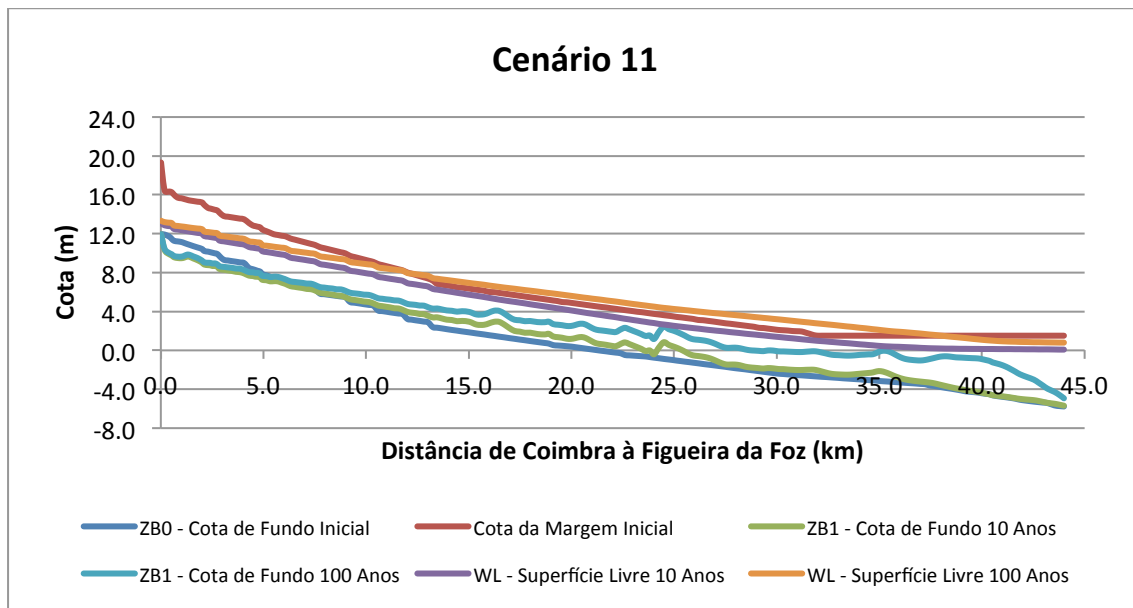
→ Cenário 11

Assoreamento (1 ano) = 153 228 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 1 867 284 m<sup>3</sup>



Assoreamento (100 anos) = 10 651 723 m<sup>3</sup>



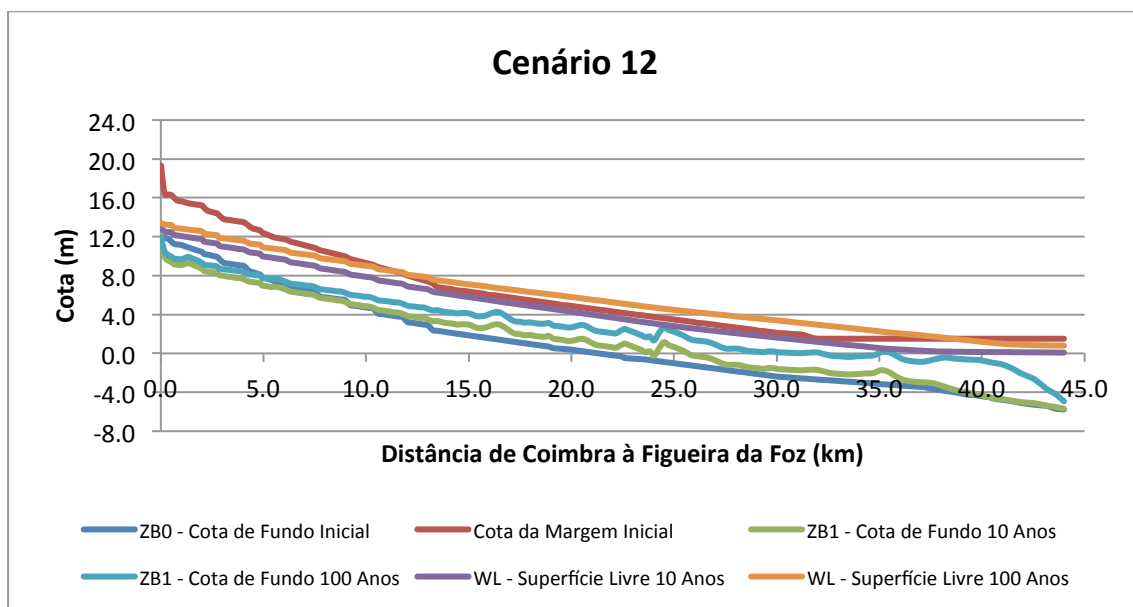
**Figura 4.17** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 11.

→ Cenário 12

Assoreamento (1 ano) = 174 298 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 292 890 m<sup>3</sup>

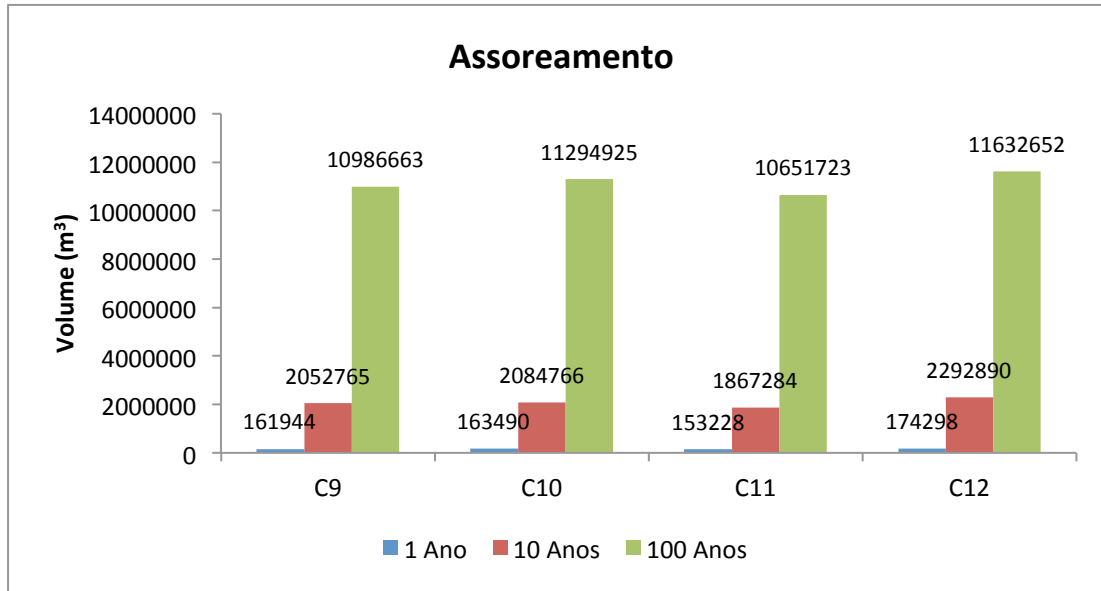
Assoreamento (100 anos) = 11 632 652 m<sup>3</sup>



**Figura 4.18** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 12.

No Anexo III – Figura 3, encontra-se um gráfico com a evolução de todos os perfis longitudinais dos cenários SLR = 8 mm/ano em 100 anos.

O gráfico da figura 4.19 apresenta os volumes de assoreamento referidos nesta secção. É possível observar que o volume para as simulações de 1, 10 e 100 anos tem sempre a seguinte ordem decrescente: C12, C10, C9 e C11. Todos os factos referidos para as figuras 4.9 e 4.14 também se aplicam à figura 4.19.



**Figura 4.19** Comparação de assoreamentos, SLR = 8 mm/ano.

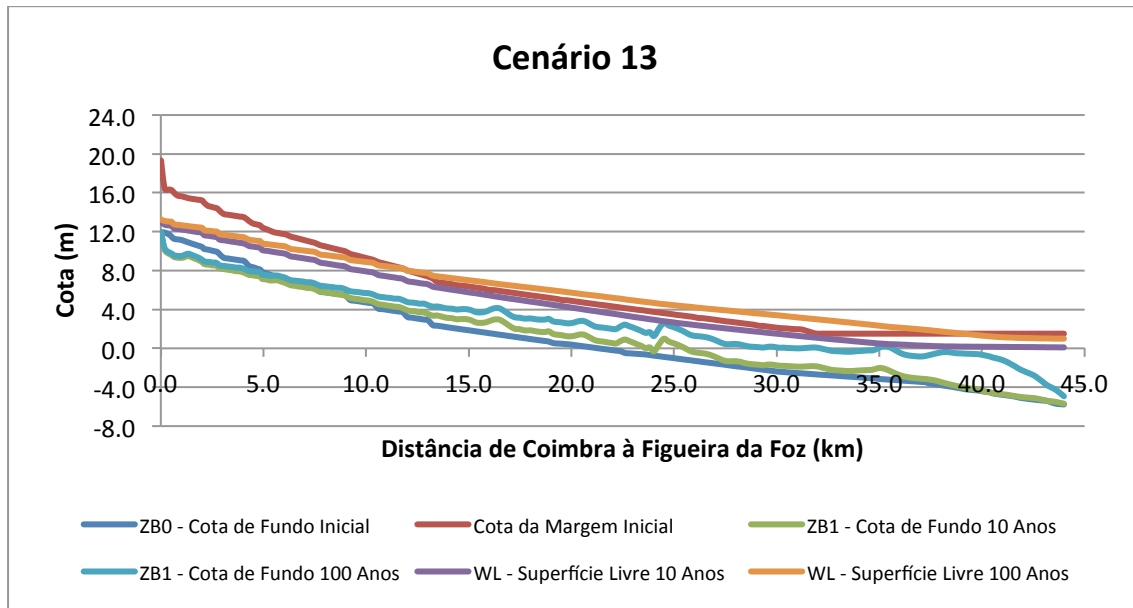
#### 4.2.1.4 Cenários com SLR = 10 mm/ano

→ Cenário 13

Assoreamento (1 ano) = 161 964 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 055 074 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 264 027 m<sup>3</sup>



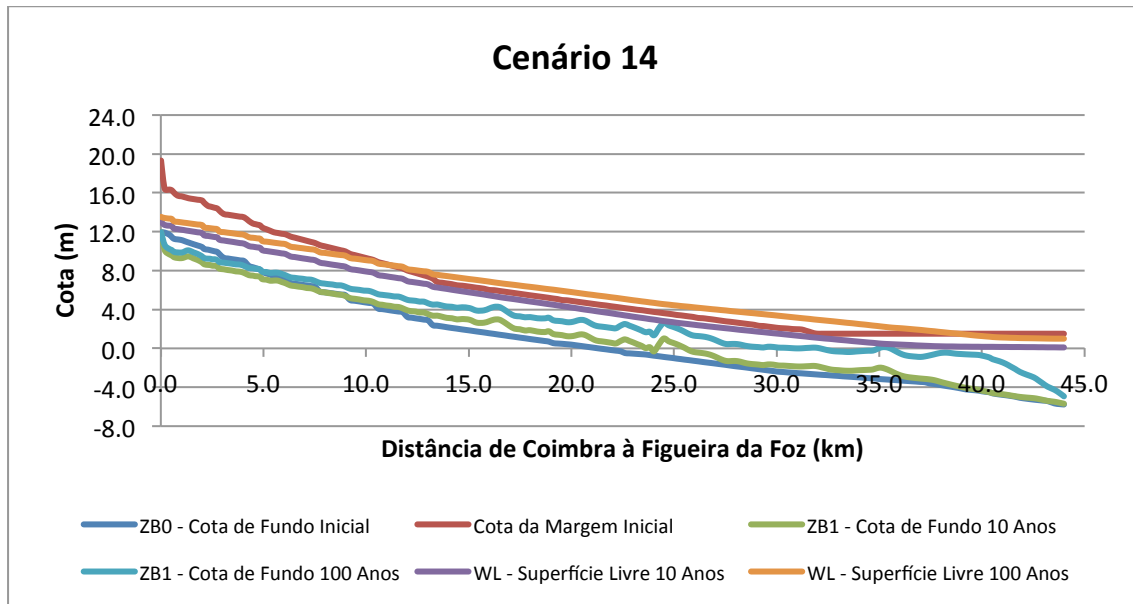
**Figura 4.20** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 13.

→ Cenário 14

Assoreamento (1 ano) = 163 506 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 086 966 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 552 064 m<sup>3</sup>



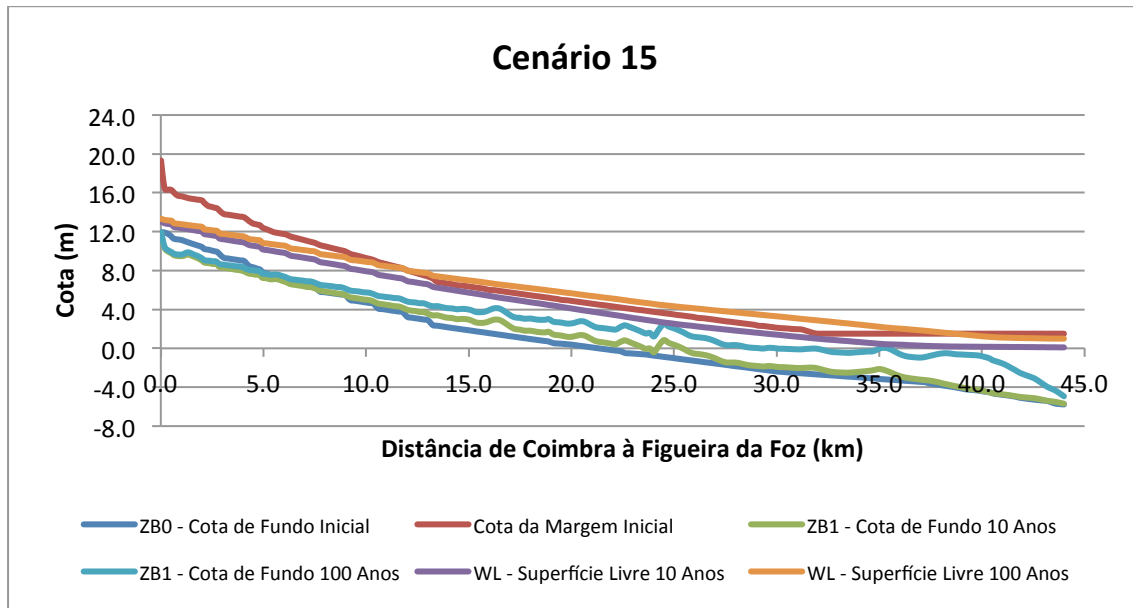
**Figura 4.21** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 14.

→ Cenário 15

Assoreamento (1 ano) = 153 242 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 1 869 498 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 10 888 564 m<sup>3</sup>



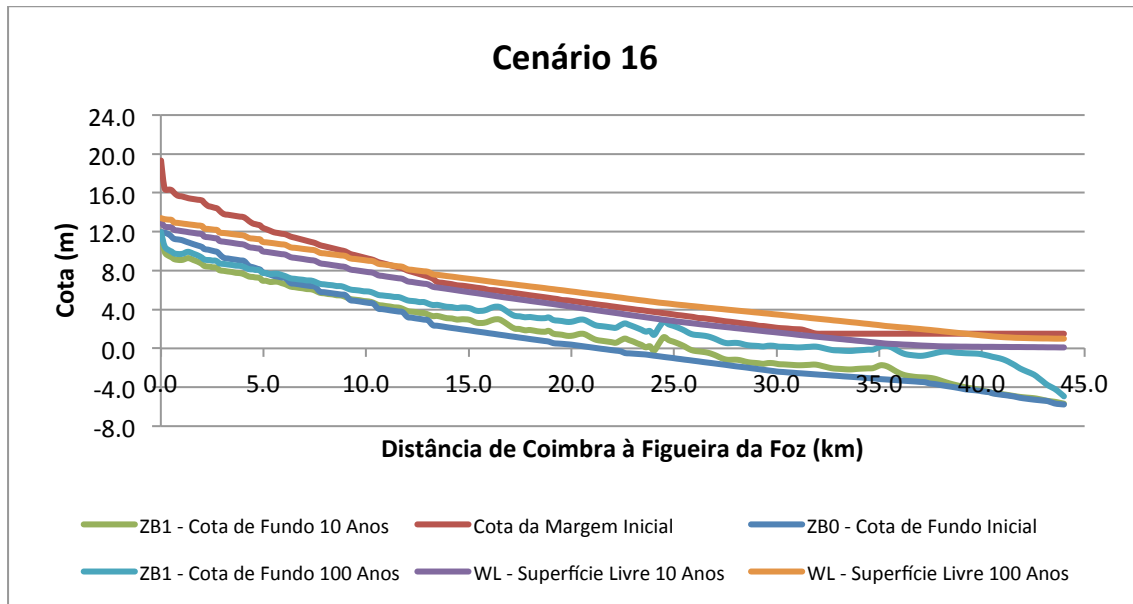
**Figura 4.22** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 15.

→ Cenário 16

Assoreamento (1 ano) = 174 312 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 294 962 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 906 901 m<sup>3</sup>



**Figura 4.23** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 16.

Um gráfico com os perfis longitudinais do conjunto de cenários, 1,0 m de subida do nível do mar em 100 anos, encontra-se no Anexo III – Figura 4.

Na figura 4.24 estão representados todos os volumes de assoreamento mencionados para SLR = 10 mm/ano. Verifica-se que o volume tem sempre a mesma ordem decrescente conforme as

simulações: C16, C14, C13 e C15. Mais uma vez, os factos referidos para os gráficos das figuras 4.9, 4.14, 4.19 também aqui são observados.

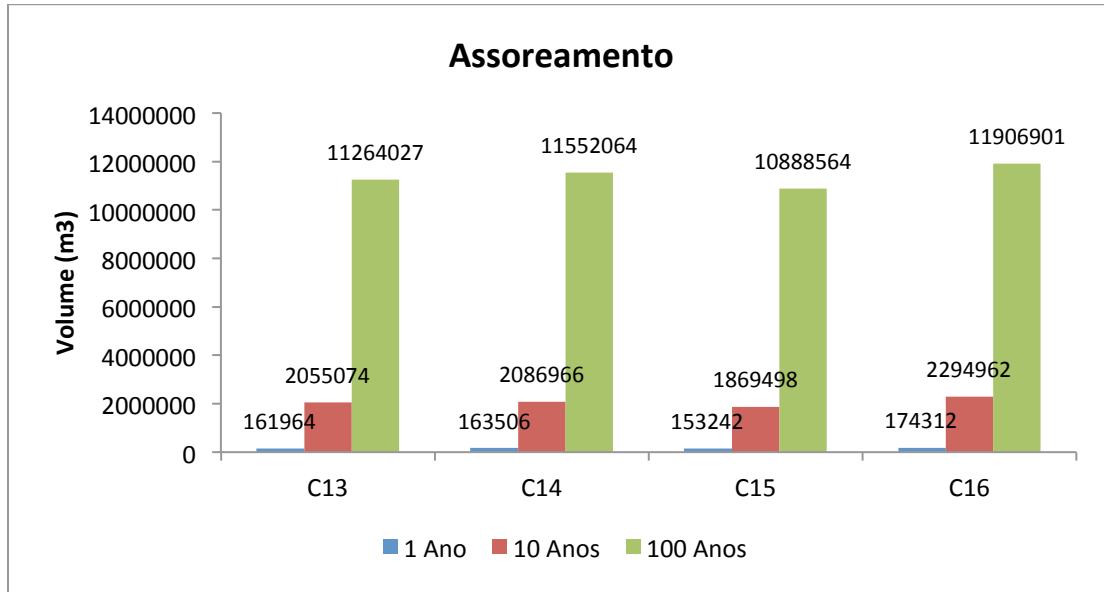


Figura 4.24 Comparação de assoreamentos, SLR = 10 mm/ano.

#### 4.2.1.5 Cenários com SLR = 12 mm/ano

→ Cenário 17

Assoreamento (1 ano) = 162 294 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 066 085 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 767 121 m<sup>3</sup>

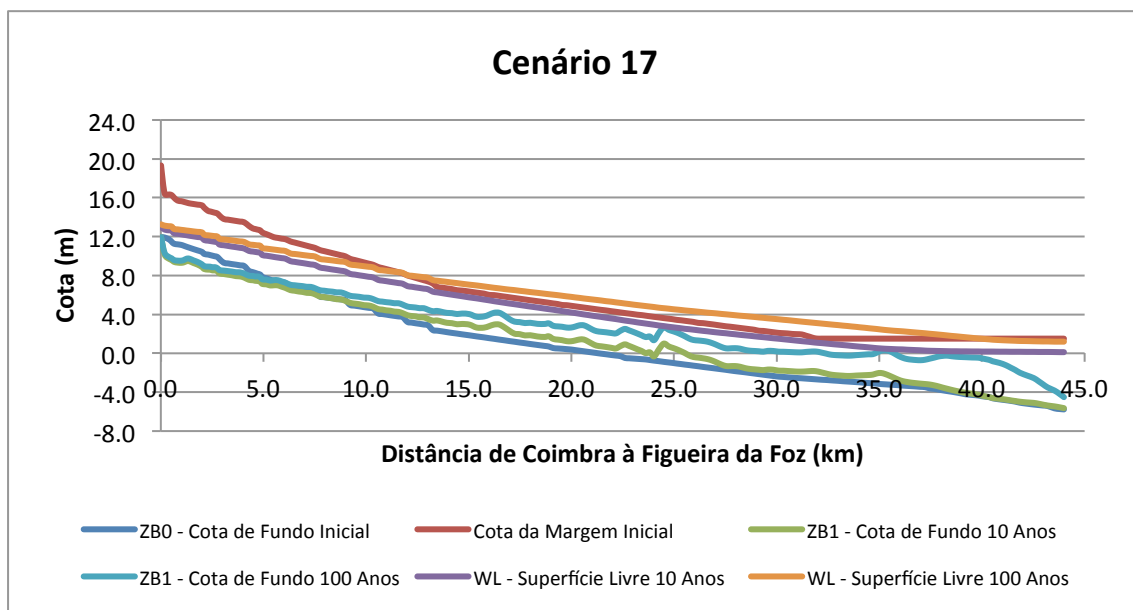


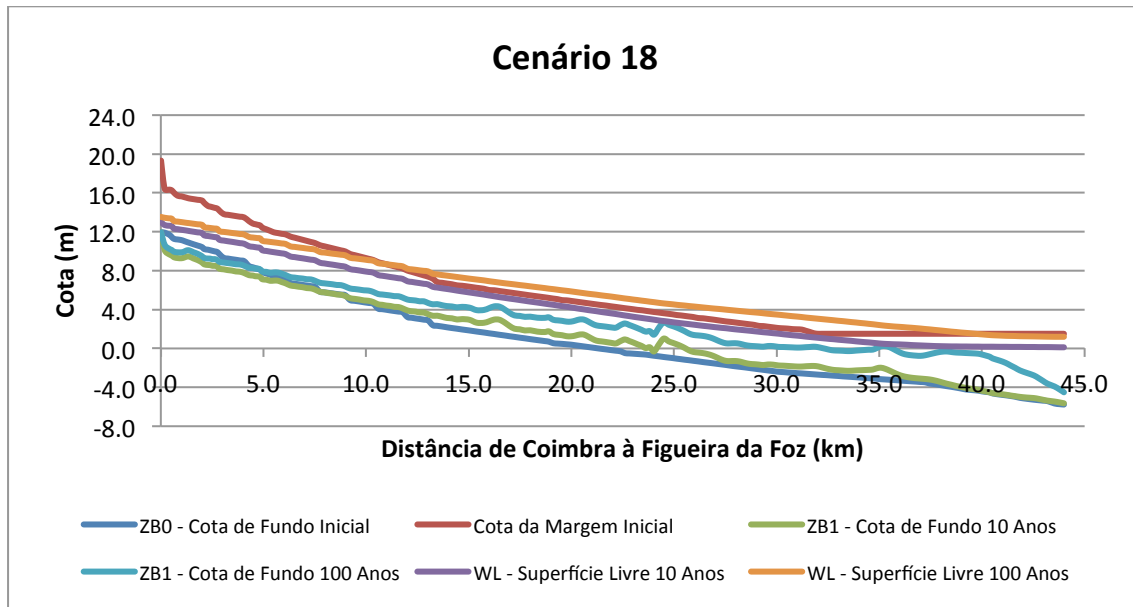
Figura 4.25 Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 17.

→ Cenário 18

Assoreamento (1 ano) = 163 821 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 098 100 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 12 013 471 m<sup>3</sup>



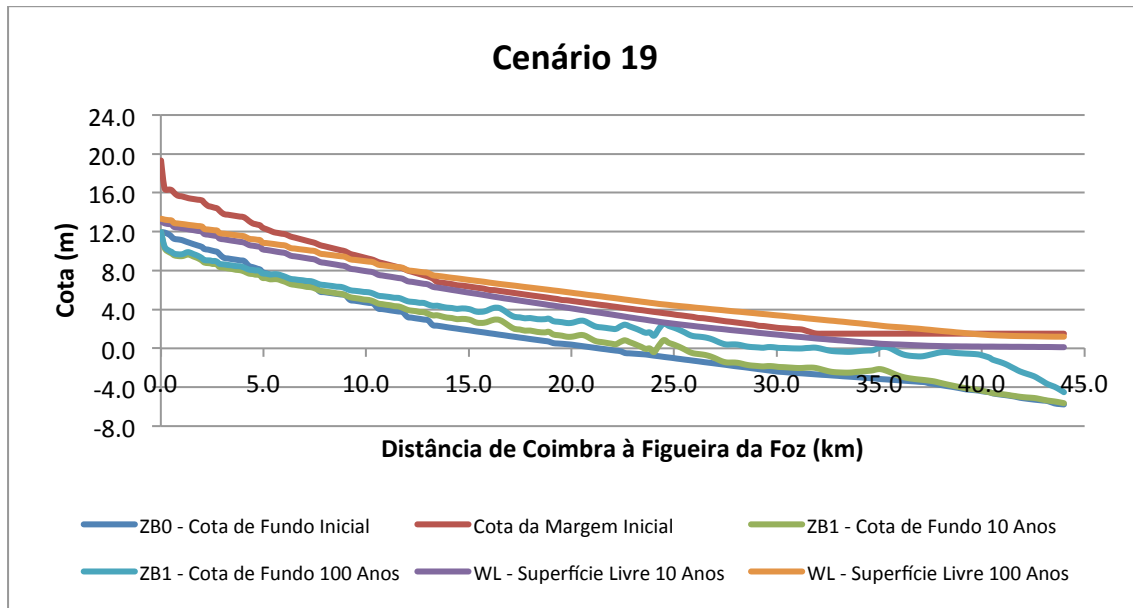
**Figura 4.26** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 18.

→ Cenário 19

Assoreamento (1 ano) = 153 558 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 1 881 187 m<sup>3</sup>

Assoreamento (100 anos) = 11 328 292 m<sup>3</sup>



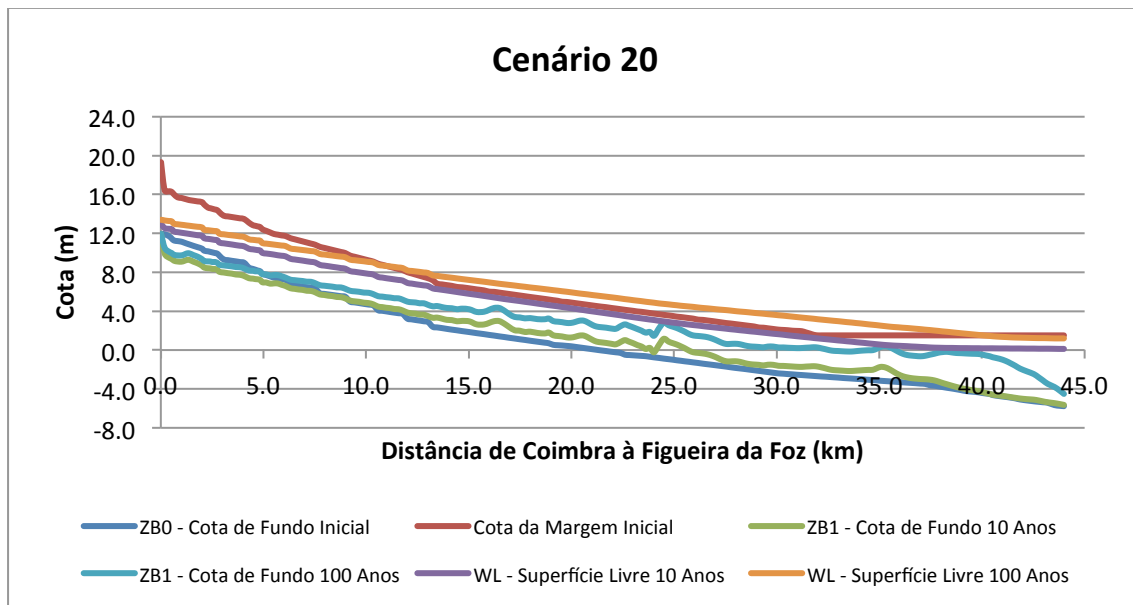
**Figura 4.27** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 19.

→ Cenário 20

Assoreamento (1 ano) = 174 646 m<sup>3</sup>

Assoreamento (10 anos) = 2 306 961 m<sup>3</sup>

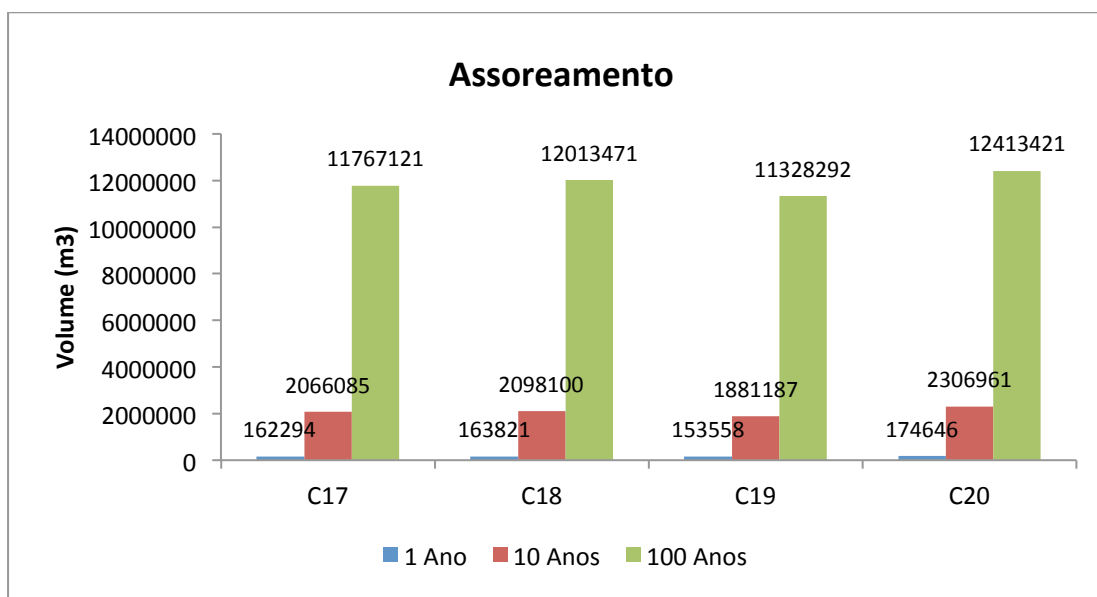
Assoreamento (100 anos) = 12 413 421 m<sup>3</sup>



**Figura 4.28** Evolução do perfil longitudinal do leito aluvionar do Baixo Mondego, Cenário 20.

O Anexo III – Figura 5 apresenta um gráfico com os perfis longitudinais com o conjunto de cenários, SLR = 12 mm/ano em 100 anos.

Na figura 4.29 estão representados todos os volumes de assoreamento obtidos para SLR = 12 mm/ano. Constata-se que o volume para 1, 10 e 100 anos tem sempre a seguinte ordem decrescente: C20, C18, C17 e C19. Todos os factos referidos para os anteriores gráficos de barras de assoreamento são visíveis nesta figura (figuras 4.9, 4.14, 4.19, 4.24 e 4.29). Isto é, as diferenças quantitativas acentuam-se com os anos mas a nível de ordem de grandeza a diferença entre os volumes mantém-se semelhante, ainda que nos primeiros 10 anos a taxa de assoreamento aparente ser maior.



**Figura 4.29** Comparação de assoreamentos, SLR = 12 mm/ano.

#### 4.2.2 Cotas de fundo (ZB)

Para a análise da resposta do leito aluvionar às previsões de subida do nível do mar, começou-se por analisar o *output* das cotas de fundo (ZB) das secções iniciais e finais de cada cenário, depois a média de ZB, posteriormente os declives do fundo e por fim, as curvas resultantes das cotas de fundo iniciais observáveis nos perfis longitudinais de 4.2.1.

A cota de fundo (ZB) na primeira secção ( $J = 1$ ) foi registada como 11,97 m, tanto em  $\Delta t = 0$  como nos resultados das simulações para 1, 10 e 100 anos de todos os cenários.

Nas simulações para 100 anos registou-se em todos os cenários um abaixamento da cota de fundo entre 0 m e 200 m, isto é,  $J = 1$  e  $J = 2$ . Entre os dados de entrada variáveis considerados verificou-se que o caudal sólido ( $S$ ) é o que terá mais influência na cota de fundo em  $J = 2$ , seguido do tamanho médio das partículas ( $MG$ ) e por fim da subida do nível do mar ( $SLR$ ). Cenários com  $S = 3$  l/s e  $MG = 2,6$  mm, têm em regra uma cota em  $J = 2$  mais elevada, também o  $SLR$  tem algum impacto, embora não tão notório, quanto maior o  $SLR$  considerado



(SLR = 12 mm/ano), tanto maior será a cota. Assim, a maior e menor cota em  $J = 2$  são para os cenários:

- C18 (10,65 m) SLR = 12 mm/ano; S = 3 l/s; MG = 2,6 mm
- C1 (10,22 m) SLR = 4 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,2 mm

Consequentemente, os valores obtidos para  $\Delta ZB = ZB1 (J=2) - ZB0 (J=2)$ , ou seja, a diferença entre a cota de fundo para a simulação de 100 anos e a cota de fundo inicial na secção  $J = 2$ , também são influenciados por ordem decrescente por: caudal sólido, tamanho médio das partículas e subida do nível do mar. Uma vez que,  $ZB0$  em  $J = 2$  é 11,91 m, e portanto superior a qualquer uma das cotas registadas em  $ZB1$  em  $J = 2$ , o maior e menor valor de  $\Delta ZB$  para os cenários são naturalmente:

- C18 (-1,26 m)
- C1 (-1,69 m)

Na última secção do trecho em estudo, ou seja,  $J = 206$ , o valor da cota é unicamente influenciado pela subida do nível do mar. Quanto maior o SLR considerado, mais elevada será a cota:

- Cenário com SLR = 12 mm/ano;  $ZB1 (J=206) = -4,51$  m
- Cenários com SLR = 10 e 8 mm/ano;  $ZB1 (J=206) = -4,93$  m
- Cenários com SLR = 6 e 4 mm/ano;  $ZB1 (J=206) = -5,35$  m

Como resultado,  $\Delta ZB = ZB1 (J=206) - ZB0 (J=206)$ , em que  $ZB0 (J=206) = -5,77$  m será também unicamente influenciado pelo SLR, obtendo-se os valores:

- Cenário com SLR = 12 mm/ano;  $\Delta ZB = 1,26$  m
- Cenários com SLR = 10 e 8 mm/ano;  $\Delta ZB = 0,84$  m
- Cenários com SLR = 6 e 4 mm/ano;  $\Delta ZB = 0,42$  m

Logo, constata-se que quando o SLR é o único factor de influência, as diferenças não são tão demarcadas.

No caso de  $\Delta ZB (J=206)$  verificam-se mudanças de cota nesta secção mais a jusante do troço, de 0,42 em 0,42 m por cada subida de 4 mm/ano de SLR (Anexo III – Tabela 2).

Relativamente às médias das cotas de fundo para as simulações de 100 anos registaram-se valores de  $\approx 3,0$  m, enquanto a média da cota de fundo inicial é 1,37 m. Analisando os resultados obtidos constatou-se que dos *inputs* que distinguem os cenários, o que tem mais influência na média é destacadamente o caudal sólido, seguido da subida do nível do mar, e por fim o tamanho médio dos sedimentos. Quanto ao caudal sólido, cenários com  $S = 3,0$  l/s apresentam médias de cota de fundo mais elevadas, em relação ao SLR verifica-se que quanto maior o valor atribuído a este dado, maior será a média, e o tamanho médio das partículas tem pouca preponderância, mas cenários com  $MG = 2,2$  mm têm médias superiores (Anexo III – Tabela 3). Assim, a maior e menor média de cota de fundo são para os cenários:

- C20 (3,27 m) SLR = 12 mm/ano; S = 3,0 l/s; MG = 2,2 mm
- C3 (2,86 m) SLR = 4 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,6 mm

Tendo em conta estes valores e a média da cota de fundo inicial constata-se que, de acordo com o modelo, nos próximos 100 anos a média da cota de fundo móvel irá aumentar em mais de 1,50 m.

Considerando os valores obtidos para as médias das cotas de fundo, ao realizar médias de  $\Delta ZB = ZB1 - ZB0$  para cada cenário, naturalmente iremos obter o mesmo padrão de importância dos *inputs*, isto é, o caudal sólido com cenários de S = 3,0 l/s com médias superiores, depois a subida do nível do mar que quanto maior for, também maior será a média de  $\Delta ZB$  e por fim, o tamanho médio das partículas, quando MG = 2,2 mm os cenários têm maiores médias de  $\Delta ZB$  (Anexo III – Tabela 4). Por conseguinte, os maiores e menores valores de  $\Delta ZB$  são para os cenários:

- C20 (1,90 m)
- C3 (1,49 m)

Os cenários C20 e C3 são também, respectivamente, aqueles que têm maior e menor volume de assoreamento para 100 anos (ver mais na secção 4.2.3).

No que diz respeito ao declive do fundo (declive da recta de regressão linear), registou-se para a cota de fundo inicial, I = 0,000368, e para as curvas das cotas de fundo das simulações para 100 anos, declives inferiores. Tendo em consideração os dados de entrada, verificou-se que o tamanho médio dos sedimentos é, com bastante diferença, o que tem mais impacto nos declives, com os cenários MG = 2,6 mm a apresentar declives maiores, depois é o caudal sólido, e por fim a subida do nível do mar, sendo que os cenários com S = 3,0 l/s e valores de SLR inferiores apresentam os maiores declives (Anexo III – Tabela 1). Assim, os cenários com o maior e menor declive (I) são:

- C2 (0,000290) SLR = 4 mm/ano; S = 3,0 l/s; MG = 2,6 mm
- C17 (0,000269) SLR = 12 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,2 mm

Portanto, de entre os *inputs* considerados a subida do nível do mar irá ter impacto fundamentalmente nas cotas do fundo das últimas secções, e em menor escala nas médias das cotas de fundo.

Os valores obtidos para os declives indicam a tendência do fundo móvel a diminuir de inclinação com o tempo, alterando a actual configuração do fundo com forte influência antropogénica para uma morfologia distinta. Podem servir de exemplo para esta situação as 11 estruturas visíveis e mencionadas na secção 3.3.1, figura 3.4 (0 a 13 km) e tabela 3.2, e não perceptíveis nos perfis longitudinais da secção 4.2.1 para 100 anos. Portanto, de acordo com o modelo, para qualquer cenário nos próximos 100 anos, as 11 estruturas deixarão de estar bem definidas no leito aluvionar.

Nos perfis longitudinais (secção 4.2.1) é possível observar em todas as figuras, nas curvas resultantes das cotas de fundo das simulações para 10 e 100 anos, a influência dos afluentes laterais, sendo o caso mais pronunciado o rio Arunca na distância de 24,5 km, em que o *input* deste afluente é:

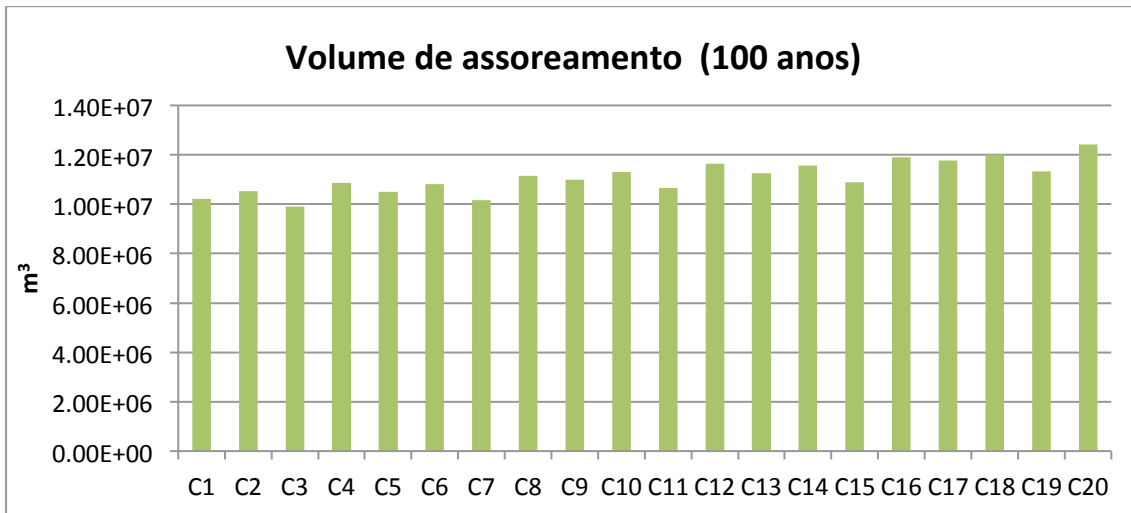
- Rio Arunca – 24,5 km – secção J = 119;  $Q = 15,90 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $S = 0,00018 \text{ m}^3/\text{s}$

Observando os perfis longitudinais é possível comparar as curvas resultantes das cotas de fundo iniciais, com as curvas das cotas de fundo para 10 e 100 anos, verificando-se que de um modo geral nos 20 cenários, para a simulação de 10 anos há erosão aproximadamente até aos 10 km, enquanto na simulação para 100 anos a erosão é até 5 a 6 km. Nestas simulações de 100 anos, depois dos 5 a 6 km de erosão há sempre assoreamento, havendo um afastamento cada vez maior entre a curva das cotas de fundo iniciais e a curva dos 100 anos ao longo do perfil longitudinal. As curvas ZB0 e ZB1 (100 anos) voltam a aproximar-se a partir da zona de estuário aos 37 km, nos gráficos da secção 4.2.1 é facilmente visível a entrada em zona de estuário nas simulações de 100 anos. No caso da curva da cota de fundo de 10 anos, a partir dos 10 km também é visível assoreamento, mas como expectável a curva segue sempre mais de perto a curva das cotas de fundo iniciais e, a partir de cerca dos 37 km até 44 km, as curvas ZB0 e ZB1 (10 anos) são praticamente coincidentes para todos os cenários. Isto porque, a morfologia do rio tende a adaptar-se a uma nova situação de equilíbrio hidromorfológico conduzindo a um declive médio igual ao que existia anteriormente, mas a longo prazo.

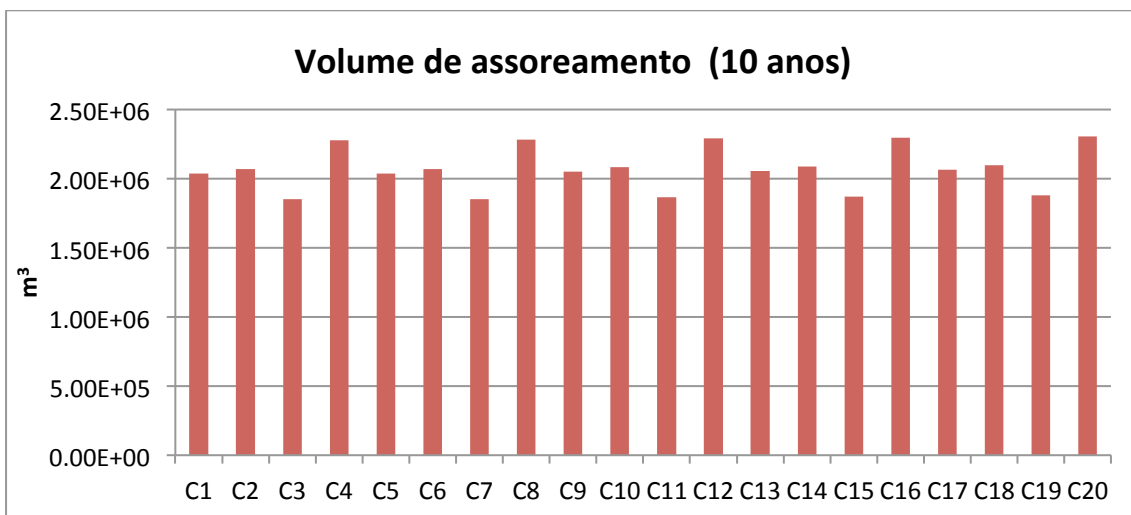
#### 4.2.3 Volumes de assoreamento

No estudo da resposta do fundo móvel ao SLR é importante fazer uma análise do assoreamento.

Os volumes de assoreamento para 1, 10 e 100 anos já foram referidos na secção dos dados de saída. Contudo, para melhor compreender a relação entre os volumes de assoreamento e os dados de entrada são em seguida apresentados gráficos de barras com todos os valores para simulações no mesmo horizonte temporal.



**Figura 4.30** Volumes de assoreamento para simulações de 100 anos.



**Figura 4.31** Volumes de assoreamento para simulações de 10 anos.

No caso dos volumes de assoreamento para 100 anos verifica-se que todo o *input* variável considerado, isto é, subida do nível do mar, caudal sólido e tamanho médio das partículas tem bastante influência. Tanto o S como o MG, de acordo com os valores atribuídos nas simulações efectuadas parecem ter importância semelhante, sendo os cenários com S = 3,0 l/s e MG = 2,2 mm os que registam geralmente maior volume de assoreamento. Como se observa no gráfico da figura 4.30 também o SLR terá influência, quanto maior o valor atribuído a SLR maior será o volume de assoreamento. Logo, como já foi referido, o maior e menor volume de assoreamento são para os cenários:

- C20 (12 413 421 m³) SLR = 12 mm/ano; S = 3,0 l/s; MG = 2,2 mm
- C3 (9 900 399 m³) SLR = 4 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,6 mm

Nos volumes de assoreamento para 10 anos também o caudal sólido e o tamanho médio dos sedimentos têm muita importância. Contudo, e como se observa na figura 4.31 neste caso a subida do nível do mar tem pouca preponderância no valor do volume, uma vez que, em 10

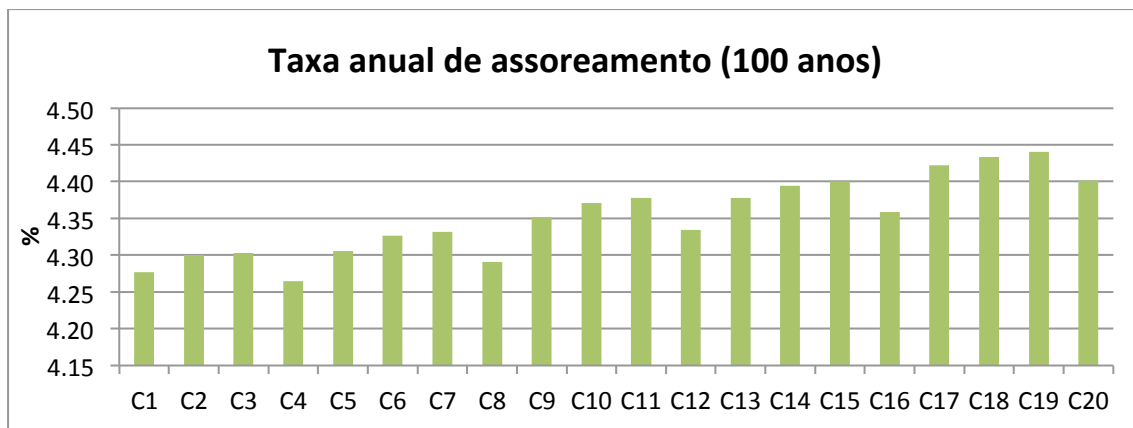
anos a morfologia do fundo do rio ainda não se está a adaptar a uma nova situação de H a jusante, o tempo de reacção morfológica não são dezenas de anos (2.2.6). Mas, também nas simulações para 10 anos os cenários com SLR = 12 mm/ano obtiveram os maiores volumes de assoreamento e os de SLR = 4 mm/ano os menores. Assim, também nas simulações para 10 anos os cenários com maior e menor volume são:

- C20 (2 306 961 m<sup>3</sup>)
- C3 (1 849 887 m<sup>3</sup>)

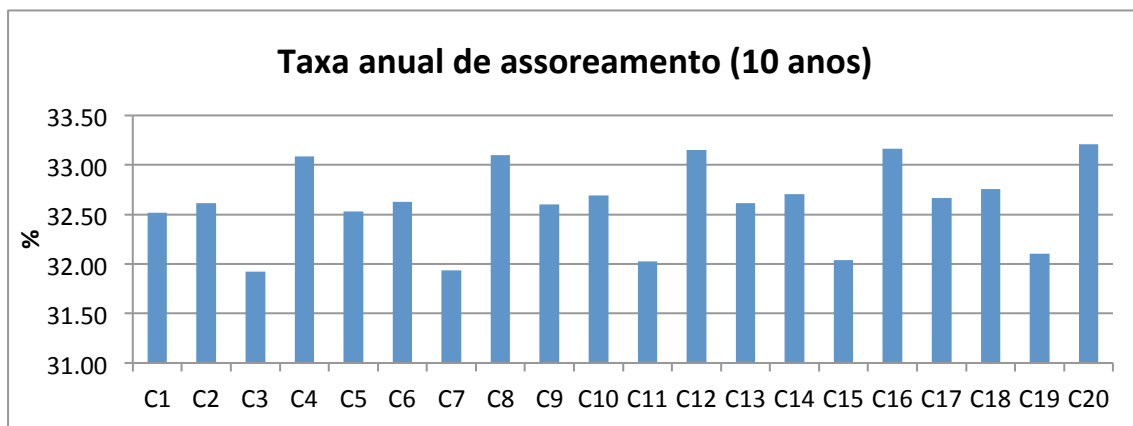
Para melhor compreender a evolução do leito aluvionar de acordo com o modelo desenvolvido foram calculadas taxas de assoreamento para 10 e 100 anos (figura 4.32 e 4.33) através da expressão (exemplo para 100 anos):

$$Taxa\ anual\ de\ assoreamento = \left( \frac{Vol\ Assoreamento\ Ano\ 100}{Vol\ Assoreamento\ Ano\ 1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \quad (4.1)$$

em que, n = nº de períodos (neste caso, n=99)



**Figura 4.32** Taxas anuais de assoreamento para os 20 cenários de acordo com as simulações para 100 anos. Valores obtidos através da expressão 4.1.



**Figura 4.33** Taxas anuais de assoreamento para os 20 cenários de acordo com as simulações para 10 anos. Valores obtidos através da expressão 4.1.

Relativamente às taxas anuais de assoreamento para as simulações de 100 anos pode-se constatar que, de entre os valores atribuídos, a subida do nível do mar é o *input* com maior influência, seguido pelo tamanho médio do sedimento e finalmente o caudal sólido, este último com pouco impacto. Quanto ao SLR e MG, quanto maior o seu valor também maior será a taxa anual de assoreamento; em relação ao S, quando dois cenários têm o mesmo valor de SLR e MG, aquele que terá maior taxa anual de assoreamento será o que possui  $S = 1,5$  l/s (Anexo III – Tabela 5). Por conseguinte, a maior e menor taxa de assoreamento (100 anos) são para os cenários:

- C19 (4,44%) SLR = 12 mm/ano;  $S = 1,5$  l/s; MG = 2,6 mm
- C4 (4,26%) SLR = 4 mm/ano;  $S = 3,0$  l/s; MG = 2,2 mm

Quanto às taxas anuais de assoreamento para as simulações de 10 anos verifica-se que os dados de entrada caudal sólido e tamanho médio das partículas são igualmente importantes, com os cenários que possuem  $S = 3,0$  l/s e MG = 2,2 mm a apresentarem as maiores taxas anuais de assoreamento. No caso do SLR, quanto maior for o valor atribuído a este *input*, maior será a taxa anual de assoreamento para as simulações de 10 anos, mas a influência é pouco significativa quando comparada com a de S e MG (Anexo III – Tabela 5). Assim, a maior e menor taxa anual de assoreamento (10 anos) são para os cenários:

- C20 (33,21%)
- C3 (31,92%)

No que diz respeito aos assoreamentos, volumes e taxas anuais para 10 e 100 anos, constata-se que só para as taxas anuais de assoreamento (100 anos) o cenário mínimo e máximo não são, respectivamente C3 e C20, sendo C4 e C19, isto é, todos seguem o mesmo padrão excepto as taxas anuais de assoreamento (100 anos). Esta situação está relacionada com o seguinte facto, tanto para os volumes de assoreamento de 10 anos como para as taxas anuais de assoreamento (10 anos), o caudal sólido e o tamanho médio dos sedimentos têm maior influência no valor final e a subida do nível do mar é menos relevante, nos volumes de assoreamento para 100 anos os três *inputs* têm todos o mesmo impacto. Enquanto que nas taxas anuais de assoreamento (100 anos) o SLR é o *input* com maior importância, seguido do MG e por fim o S. Neste caso específico dos valores dos cenários máximos e mínimos, a distinção está no facto que os volumes de assoreamento para 10 e 100 anos e as taxas anuais de assoreamento para 10 anos têm os maiores valores quando  $S = 3,0$  l/s e MG = 2,2 mm; enquanto que no caso das taxas anuais de assoreamento para 100 anos, os maiores valores correspondem a cenários com  $S = 1,5$  l/s e MG = 2,6 mm (devido aos valores obtidos para 1 ano – Anexo III – Tabela 6).

Os volumes de assoreamento e as taxas anuais de assoreamento obtidas devem ser analisados tendo em conta alguns factores, nomeadamente o facto de nos primeiros anos simulados se prever que S seja superior, aproximado dos 3 l/s considerados, e depois venha a diminuir ao longo dos 100 anos até 1,5 l/s, o que daria origem a volumes de assoreamento

superiores nestes primeiros anos e diminuiria o impacto do caudal sólido no assoreamento ao longo dos anos. Contudo, também se deve ter em conta, que nos primeiros anos o SLR nem sequer se prevê que seja de 4 mm/ano, mas sim mais próximo de 3 mm/ano, tal como se verificou na última década, e haverá uma aceleração da subida do nível do mar durante o século que poderá ir até  $SLR = 12$  mm/ano (secção 2.3), dando origem a volumes de assoreamento crescentes e aumento do impacto da subida do nível do mar ao longo dos 100 anos.

Como é visível através dos volumes de assoreamento, das taxas anuais de assoreamento e dos gráficos de perfis longitudinais (secção 4.2.1), de acordo com o modelo haverá mais assoreamento nos primeiros anos devido sobretudo ao caudal sólido, e depois a situação tende a estabilizar, passando o SLR a ser o principal responsável pela deposição dos sedimentos. Daí a importância que o caudal sólido afluente de 1,5 l/s, para o qual as obras de regularização fluvial foram projectadas, seja alcançado, para evitar excesso de assoreamento a jusante.

Como já foi referido anteriormente os volumes de assoreamento mencionados no *output* são assim designados porque, em termos de balanço de volumes há assoreamento mas, tal como foi referido e é observável nos gráficos das figuras da secção 4.2.1, para as simulações de 100 anos nos primeiros 5 a 6 km do trecho em estudo, ocorre erosão.

Assim, considerando os volumes de assoreamento e os dados  $\Delta ZB$ , largura do fundo (WR) e distância à origem, fez-se uma estimativa de qual seria o volume de erosão em cada cenário, através da expressão ( $m^3$ ):

$$Volume = média(\Delta ZB) \times média(WR) \times distância \quad (4.2)$$

Aqui, as médias  $\Delta ZB$  e WR são calculadas para valores entre  $J = 1$  e  $J$  correspondente a cada cenário na tabela 4.3.

**Tabela 4.3** Volume de erosão e assoreamento em cada cenário (100 anos).

Cenário	Erosão (m <sup>3</sup> )	Distância (m)	J	Assoreamento (m <sup>3</sup> )	Distância (m)	J	Ers+Asr. (m <sup>3</sup> )
<b>C1</b>	<b>537745</b>	6078	38	10750943	43993	206	10213198
<b>C2</b>	364658	4950	32	10899552	43993	206	10534894
<b>C3</b>	467230	5326	34	<b>10367629</b>	43993	206	<b>9900399</b>
<b>C4</b>	437619	5326	34	11299532	43993	206	10861913
<b>C5</b>	526531	6078	38	11017379	43993	206	10490848
<b>C6</b>	352101	4950	32	11159826	43993	206	10807725
<b>C7</b>	456881	5326	34	10628443	43993	206	10171562
<b>C8</b>	423551	5138	33	11562646	43993	206	11139095
<b>C9</b>	517920	5326	34	11504583	43993	206	10986663
<b>C10</b>	349247	4840	31	11644172	43993	206	11294925
<b>C11</b>	446001	5326	34	11097724	43993	206	10651723
<b>C12</b>	409413	4950	32	12042065	43993	206	11632652
<b>C13</b>	505800	5326	34	11769827	43993	206	11264027
<b>C14</b>	340165	4840	31	11892229	43993	206	11552064
<b>C15</b>	436731	5326	34	11325295	43993	206	10888564
<b>C16</b>	398779	4950	32	12305680	43993	206	11906901
<b>C17</b>	489882	5326	34	12257003	43993	206	11767121
<b>C18</b>	<b>329565</b>	4720	30	12343036	43993	206	12013471
<b>C19</b>	423606	5138	33	11751898	43993	206	11328292
<b>C20</b>	386952	4950	32	<b>12800373</b>	43993	206	<b>12413421</b>

Como se pode constatar os cenários com menor e maior volume de assoreamento obtidos através desta expressão coincidem com os volumes de assoreamento do modelo, isto é, C3 e C20. Contudo, é de notar que o menor volume de erosão não se verifica no cenário com maior volume de assoreamento, e o mesmo para o maior volume de erosão, estes foram:

- C1 (537 745 m<sup>3</sup>) SLR = 4 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,2 mm
- C18 (329 565 m<sup>3</sup>) SLR = 12 mm/ano; S = 3,0 l/s; MG = 2,6 mm

Esta situação verificou-se porque, de acordo com o *output*, a erosão de C1 foi até uma distância à origem maior do que C3 (figura 4.5 e 4.7) e no caso de C18 o oposto, isto é, as médias foram calculadas até uma distância à origem menor do que para C20 (figura 4.26 e 4.28).

#### 4.2.4 Superfície livre (WL) e Alturas de água (H)

O *output* referente à superfície livre (WL) e às alturas de água (H) também foi analisado, devido ao efeito que o SLR tem nestes valores e à importância de WL e H na gestão do Baixo Mondego.



No que diz respeito às cotas da superfície livre na primeira secção ( $J = 1$ ) para as simulações de 100 anos, registou-se que dos dados de entrada variáveis tidos em consideração neste estudo o que apresentou maior influência foi o caudal sólido, quando  $S = 3,0$  l/s as cotas registadas foram superiores, depois o tamanho médio dos sedimentos, para  $MG = 2,6$  mm as cotas são mais elevadas e por fim, a subida do nível do mar, que tem um efeito reduzido nas cotas de  $J=1$ , contudo quando dois cenários têm o mesmo  $S$  e  $MG$ , o que apresentará maior cota será aquele a que foi atribuído um maior valor no *input* SLR (Anexo III – Tabela 7). Portanto, a maior e menor cota de WL em  $J=1$  são para os cenários:

- C18 (11,77 m) SLR = 12 mm/ano;  $S = 3,0$  l/s;  $MG = 2,2$  mm
- C1 (11,37 m) SLR = 4 mm/ano;  $S = 1,5$  l/s;  $MG = 2,6$  mm

Na secção  $J = 2$  há em todos os cenários para a simulação de 100 anos um abaixamento da cota de superfície livre em relação a  $J = 1$ . A importância dos dados de entrada nos valores registados é a mesma que para a primeira secção, logo a maior e menor cota será para os mesmos cenários:

- C18 (11,72 m)
- C1 (11,32 m)

De realçar que C18 e C1 são também os cenários com menor e maior volume de erosão (secção 4.2.3). Portanto, é natural que apresentem níveis de superfície livre mais elevados na primeira secção.

A variação  $\Delta WL = WL (J=1) - WL (J=2)$  toma apenas dois valores para todos os cenários,  $\Delta WL = -0,05$  m ou  $\Delta WL = -0,06$  m (Anexo III – Tabela 7).

O valor da altura de água é calculado por  $H = WL - ZB1$ . Como  $ZB1 (J=1) = 11,97$  m em todos os cenários para 100 anos (secção 4.2.2) e WL varia, na primeira secção a ordem decrescente da influência dos dados de entrada variáveis considerados na simulação é  $S$ ,  $MG$  e  $SLR$ , tal como  $WL(J=1)$  (Anexo III – Tabela 8). Logo, os cenários de maior e menor  $H$  serão os mesmos de WL para a primeira secção:

- C18 (1,56 m)
- C1 (1,21 m)

No caso da secção  $J = 2$  todos os cenários têm valores distintos de  $ZB1$  para a simulação de 100 anos. Por conseguinte, a preponderância dos *inputs* nas alturas de água de cada cenário será um pouco distinta. Neste caso  $S$  e  $MG$  têm a mesma importância, seguidos de  $SLR$ . Contudo, aqui as maiores alturas de água verificam-se quando  $S = 3,0$  l/s e  $MG = 2,2$  mm (Anexo III – Tabela 8). Portanto, a maior e menor altura de água em  $J = 2$  são para os cenários:

- C17 (2,83 m) SLR = 12 mm/ano;  $S = 1,5$  l/s;  $MG = 2,2$  mm
- C2 (2,76 m) SLR = 4 mm/ano;  $S = 3,0$  l/s;  $MG = 2,6$  mm
- C6 (2,76 m) SLR = 6 mm/ano;  $S = 3,0$  l/s;  $MG = 2,6$  mm

Como se pode constatar neste caso a amplitude de valores para as alturas de água em  $J = 2$  é reduzida.

Consequentemente, os valores de  $\Delta H = H(J=2) - H(J=1)$ , serão sobretudo influenciados por  $H(J=1)$ , uma vez que este tem uma variação entre máximo e mínimo de altura de água de 0,35 m, enquanto  $H(J=2)$  apresenta uma amplitude de 0,07 m (Anexo III – Tabela 8). Por conseguinte, o maior e menor valor de  $\Delta H$  serão o oposto de  $WL(J=1)$  e  $H(J=1)$ :

- C1 (1,59 m)
- C18 (1,23 m)

Nas duas últimas secções ( $J = 205$  e  $J = 206$ ) a superfície livre, tal como a cota de fundo, é influenciada apenas pela subida do nível do mar, quanto maior o SLR, maior a cota:

- Cenários com SLR = 12 mm/ano; WL = 1,20 m
- Cenários com SLR = 10 mm/ano; WL = 1,00 m
- Cenários com SLR = 8 mm/ano; WL = 0,80 m
- Cenários com SLR = 6 mm/ano; WL = 0,60 m
- Cenários com SLR = 4 mm/ano; WL = 0,40 m

Verifica-se que o WL para 100 anos reflecte sempre o valor atribuído a SLR. O mesmo acontece nas simulações para 10 anos, neste caso as cotas da superfície livre na secção  $J = 206$  são 0,04 m; 0,06 m; 0,80 m; 0,10 m; 0,12 m.

De referir que para os cenários com SLR = 12 mm/ano, 10 mm/ano e 6 mm/ano, a cota da superfície livre é a indicada desde a secção  $J = 204$  (43,53 km), enquanto que para SLR = 6 e 8 mm/ano, a cota regista-se a partir de  $J = 205$  (43,78 km) (Anexo III – Tabela 7).

Como resultado dos valores mencionados anteriormente para as secções mais a jusante do trecho em estudo, verifica-se que as alturas de água na secção  $J = 205$  são maiores para SLR = 6 mm/ano e 10 mm/ano, isto porque as cotas de fundo na secção  $J = 205$  são muito próximas para cenários com SLR = 4 mm/ano e 6 mm/ano, e os valores de ZB1 são também próximos entre si para cenários com SLR = 8 mm/ano e 10 mm/ano; quanto ao WL ( $J=205$ ) como foi referido, aumenta 0,40 m para cada SLR de 4 mm/ano. Logo, os maiores e menores valores em simulações para 100 anos de  $H(J=205)$  são para os cenários:

- C15 (5,61 m) SLR = 10 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,6 mm
- C4 (5,27 m) SLR = 4 mm/ano; S = 3,0 l/s; MG = 2,2 mm

Quanto a  $H(J=206)$  verificam-se valores que dependem unicamente de SLR, tal como para a cota de fundo e superfície livre nesta secção. Portanto as alturas de água nesta secção são:

- Cenários com SLR = 4 mm/ano;  $H(J=206) = 5,75$  m
- Cenários com SLR = 6 mm/ano;  $H(J=206) = 5,95$  m
- Cenários com SLR = 8 mm/ano;  $H(J=206) = 5,73$  m
- Cenários com SLR = 10 mm/ano;  $H(J=206) = 5,93$  m

- Cenários com SLR = 12 mm/ano; H (J=206) = 5,71 m

A altura de água demonstra tendência para diminuir na última secção do trecho do Baixo Mondego em estudo com o aumento do SLR, porque há também um maior assoreamento nesta secção, ZB1 (J=206) = -4,51 m (secção 4.2.2). Por conseguinte, é para simulações com *input* SLR = 12 mm/ano que se verificam valores menores de  $\Delta H = H (J=206) - H (J=205)$ , e para simulações com SLR = 4 mm/ano, que se verificam maiores valores para  $\Delta H = H (J=206) - H (J=205)$  (Anexo III – Tabela 8).

Quanto às médias da superfície livre nas simulações para 100 anos registaram-se valores de  $\approx 6,0$  m. Observando os resultados obtidos constatou-se que entre os dados de entrada variáveis considerados na simulação, o que tem mais influência é o caudal sólido, sendo maiores as médias de WL quando  $S = 3,0$  l/s, depois o SLR, que quanto maior o valor atribuído, maior a média e por fim, o tamanho médio dos sedimentos, em que cenários com  $MG = 2,2$  mm têm maior média de WL (Anexo III – Tabela 3). Assim, os cenários de maior e menor média de WL e ZB1 são os mesmos:

- C20 (6,30 m) SLR = 12 mm/ano;  $S = 3,0$  l/s;  $MG = 2,2$  mm
- C3 (5,83 m) SLR = 4 mm/ano;  $S = 1,5$  l/s;  $MG = 2,6$  mm

As médias de H também são influenciadas por ordem decrescente por S, SLR e MG, tal como se verificou para as médias das cotas de fundo (secção 4.2.2) e da superfície livre. No entanto, neste caso é de realçar que as médias são maiores quando  $S = 1,5$  l/s e o tamanho médio das partículas não demonstra uma tendência definida, ou seja, para cenários com o mesmo S e SLR não se sabe qual será o cenário com a maior média de alturas de água, se  $MG = 2,6$  mm ou  $MG = 2,2$  mm (Anexo III – Tabela 4). A maior e menor média de H obtidas para as simulações de 100 anos foram para os cenários:

- C19 (3,05 m) SLR = 12 mm/ano;  $S = 1,5$  l/s;  $MG = 2,6$  mm
- C2 (2,95 m) SLR = 4 mm;  $S = 3,0$  l/s;  $MG = 2,6$  mm

É natural que cenários com  $S = 1,5$  l/s tenham uma maior altura de água, uma vez que, o valor de ZB1 será inferior.

Apesar de  $\Delta H = H (J=206) - H (J=205)$ , apresentar valores superiores para cenários com SLR = 4 mm/ano, no que se refere às médias as alturas de águas estas são maiores quanto maior for o valor atribuído a SLR.

Relativamente aos declives das curvas da superfície livre (declive da recta de regressão linear) registou-se para a cota da margem inicial  $I = 0,000344$ , e para os níveis da superfície livre valores inferiores mas semelhantes aos que se verificaram para as cotas de fundo. A influência dos *inputs* variáveis nos valores de I será a mesma que para os declives das curvas das cotas de fundo, isto é, por ordem decrescente MG, S e SLR. Com os cenários com tamanho médio das partículas de 2,6 mm, caudal sólido de 3,0 l/s e subida do nível do mar de 4 mm/ano a

apresentar maiores declives. Porém, é de realçar que, apesar de possuírem a mesma ordem de influência dos *inputs*, de acordo com o modelo, o SLR terá mais efeito nos declives de WL que de ZB1.

Os cenários com menor e maior valor obtido de declive da superfície livre na simulação de 100 anos coincidiram com os cenários com maior e menor *I* para as cotas de fundo na simulação de 100 anos:

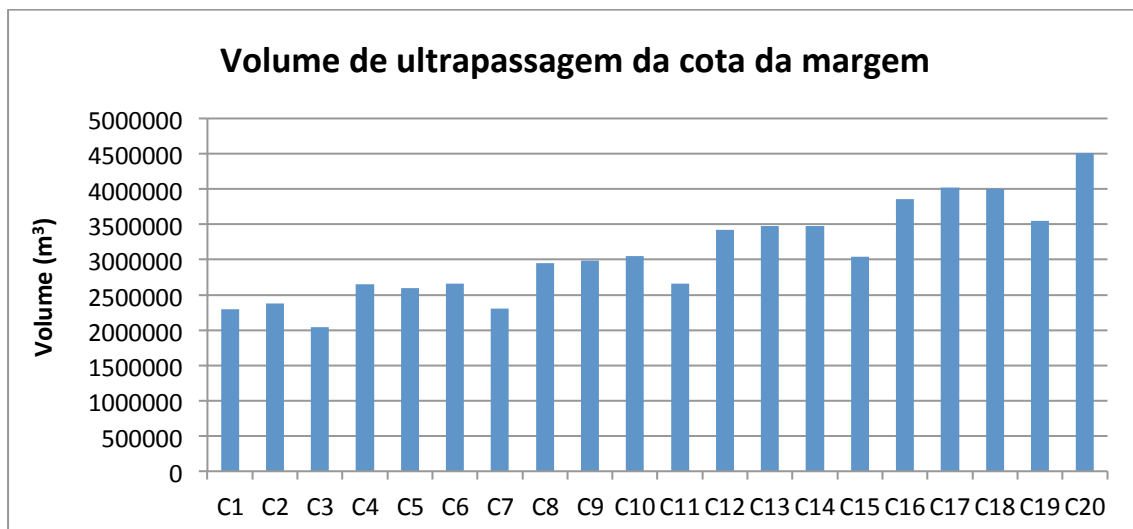
- C2 (0,000297) SLR = 4 mm/ano; S = 3,0 l/s; MG = 2,6 mm
- C17 (0,000274) SLR = 12 mm/ano; S = 1,5 l/s; MG = 2,2 mm

Nos perfis longitudinais da secção 4.2.1 é possível observar que numa previsão do trecho do Baixo Mondego a 100 anos, é expectável que a superfície livre venha a ultrapassar a actual cota da margem em qualquer um dos cenários considerados. De acordo com os perfis longitudinais esta ultrapassagem irá ocorrer em todos os cenários aproximadamente no intervalo de distâncias de 11 a 12,5 km até 37 a 40 km.

Foram calculados volumes de ultrapassagem da cota da margem com base nos dados de *H*, distância entre margens (*WA*) e distância à origem, através da expressão:

$$Volume = média(H) \times média(WA) \times distância \quad (4.3)$$

Os valores obtidos são apresentados no seguinte gráfico de barras (figura 4.34), onde se pode constatar que de entre os *inputs* variáveis o que tem mais influência na ultrapassagem da cota da margem inicial é o SLR, enquanto o *S* e *MG* têm um impacto semelhante, com os cenários que têm *S* = 3,0 l/s e *MG* = 2,2 mm a obter maiores volumes de ultrapassagem da cota de margem.



**Figura 4.34** Volumes de ultrapassagem da cota da margem obtidos nas simulações para 100 anos, calculados através da expressão 4.3.

# Capítulo V – Conclusões e Perspectivas futuras

A aceleração no ritmo da subida do nível do mar nas últimas décadas e o seu previsível aumento é um assunto de extrema relevância nos dias de hoje, não só ao nível da gestão costeira, como também pelo seu impacto nos sistemas fluviais a montante. A complexidade das interacções estabelecidas entre áreas mais ou menos próximas do sistema estuarino, quer em direcção à terra quer ao longo da costa, leva à necessidade de haver abordagens integradas das problemáticas levantadas, por forma a que o próprio conceito de “contínuo natural” possa assumir pleno significado no aprofundar do conhecimento sobre as articulações que existem entre os diversos ambientes.

Neste contexto, o presente trabalho teve dois principais objectivos: o desenvolvimento de um modelo computacional para a simulação de processos morfológicos em leitos aluvionares, inovador por incluir nos dados de entrada o parâmetro da subida do nível do mar; e a sua aplicação ao caso específico do Baixo Mondego, considerado não só como caso teste, mas também com a finalidade de obter previsões relativas à evolução do fundo móvel e alturas de água desta região, onde desde há centenas de anos há registo de problemas ao nível de cheias e inundações.

Os quatro testes realizados com vista à calibração do modelo, permitiram confirmar a sua robustez e fiabilidade, possibilitando assim confiança no *output* obtido nas simulações no trecho para 1, 10 e 100 anos.

O estudo da evolução do leito aluvionar através do modelo desenvolvido produziu resultados muito claros. O assoreamento foi no passado o grande problema no Baixo Mondego e prevê-se que se possa voltar a verificar nos próximos 100 anos, uma vez que, em qualquer dos cenários projectados, a sedimentação no troço mais a jusante do rio Mondego irá acontecer, tendendo a piorar quanto mais elevada for a subida do nível do mar. Há um impacto significativo do SLR nas cotas de fundo, superfície livre e alturas de água dos leitos dos rios aluvionares. As tendências apontam para cenários já vistos no passado nesta área, muito assoreamento a jusante, alguma erosão a montante e ultrapassagem da cota da margem numa grande porção do leito aluvial, situação que requer uma constante monitorização e fiscalização.

Para as simulações de 100 anos verificou-se que os cenários com maior e menor cota de fundo e superfície livre coincidem nas secções iniciais onde há pouca influência da subida do nível do mar. As médias de ZB1 e WL têm o seu máximo e mínimo para os mesmos cenários, contudo neste caso o SLR já tem alguma influência no valor final. As cotas de fundo, superfície livre e consequentemente, altura de água nas últimas secções do trecho em estudo são unicamente influenciadas pela subida do nível do mar. Portanto, a influência do SLR no perfil longitudinal do trecho em estudo diminui de jusante para montante. Contudo, a subida do nível do mar, de acordo com o modelo desenvolvido, tem efeito nas cotas de fundo, nos níveis de superfície livre e nas alturas de água ao longo de todo o perfil longitudinal, o que não se verifica com o caudal sólido e o tamanho médio dos sedimentos. A mesma situação não se constatou nas simulações de 10 anos em que o SLR tem efeito apenas nas últimas secções do troço em estudo, isto porque a subida do nível do mar implica um novo equilíbrio hidromorfológico e consequentes alterações no fundo do rio, mas o tempo de reacção morfológica é uma medida de tempo na ordem das centenas de anos e não se irá manifestar em dezenas de anos.

Importa também referir que, se o funcionamento adequado dos aproveitamentos hidroeléctricos do Baixo Mondego não se efectivar e, por conseguinte, a média do caudal sólido não diminuir para o valor projectado aquando das obras de regularização fluvial ( $S = 1,5 \text{ l/s}$ ), o risco de cheias e inundações será maior. Isto porque, de acordo com o modelo haverá mais assoreamento nos primeiros anos devido sobretudo ao caudal sólido, e depois a situação tende a estabilizar, passando o SLR a ser o principal responsável pela deposição dos sedimentos. Daí a importância que o valor de caudal sólido afluente  $1,5 \text{ l/s}$ , para o qual as obras de regularização fluvial foram projectadas, seja alcançado.

Relativamente ao tamanho médio dos sedimentos, como esperado, os cenários a que foram atribuídos valores inferiores, verificaram maiores alterações no leito aluvionar e uma maior subida da altura de água do rio. Os cenários que consideraram  $MG = 2,2 \text{ mm}$  provavelmente obtiveram resultados mais fidedignos, isto porque o tamanho das partículas transportadas por arrastamento diminui de montante para jusante e o trecho em estudo, por se tratar de um canal numa planície, o troço final de um rio e incluir uma zona estuarina, terá um grande volume de partículas de diâmetro médio aproximadamente correspondente a areia média/fina. Logo, as simulações em que se considerou  $MG = 2,2 \text{ mm}$  estarão mais próximas da realidade, até porque  $MG = 2,6 \text{ mm}$  foi um valor registado em Coimbra. Contudo neste estudo optou-se por considerar os dois valores conhecidos e registados.

Ao longo do trabalho verificou-se que apesar de haver alguma informação relativa à subida do nível do mar na orla costeira portuguesa na sua globalidade, o mesmo não se verifica a nível local. De acordo com as previsões do IPCC,  $SLR = 6 \text{ mm/ano}$  e  $SLR = 8 \text{ mm/ano}$  são as subidas de nível do mar com maior probabilidade de ocorrência na costa portuguesa nos próximos 100 anos, logo os valores obtidos para os cenários C5 a C12 serão os mais prováveis.

Durante a realização deste trabalho foi frequente o obstáculo da falta de informação, nomeadamente no que se refere aos sedimentos e a todas as características do sistema associadas. Assim, para além de um constante controlo de caudais líquidos do Baixo Mondego, recomenda-se também um programa regular de monitorização de caudais sólidos, granulometria do material do leito e batimetria do fundo do rio. Estes dados são difíceis de obter, contudo, tal como foi demonstrado, face à gravidade que a subida do nível do mar pode significar, o esforço necessário para obter estas informações é uma medida preventiva necessária.

Uma limitação do modelo é o facto de não considerar alterações de caudal sólido em  $\Delta t$ , uma vez que se prevê que este venha a diminuir até  $S = 1,5$  l/s mas o valor ainda não foi atingido, se fosse atribuída variação anual a  $S$  certamente os valores de assoreamento seriam distintos e com maior aproximação à realidade. Outra das limitações do modelo computacional criado é o facto do diâmetro das partículas assumir apenas um valor na simulação. Por exemplo, no caso específico da modelação realizada, os valores de assoreamento obtidos são possivelmente inferiores aos que se virão a verificar por terem sido considerados diâmetros médios das partículas, registados na parte mais a montante do troço em estudo, logo maiores do que os diâmetros mais a jusante, nomeadamente na zona estuarina.

Assinala-se ainda que no modelo gerado não se incluiu a aceleração exponencial da subida do nível do mar, atribuindo ao SLR um valor anual constante, o que condiciona os resultados obtidos e deverá ser alterado em modelos futuros.

Um outro passo a dar no seguimento deste trabalho poderá ser a substituição do caudal dominante por séries de caudais mensais, semanais ou mesmo diários afluentes, de acordo com o regime hidrológico. Por exemplo, o rio Mondego tem um regime pluvial e torrencial/semi-torrencial e o braço Norte sabe-se que evidencia grande hidrodinâmica e fortes variações anuais ao nível do escoamento, por conseguinte as séries referidas anteriormente seriam adequadas ao trecho em estudo.

No Baixo Mondego é previsível que devido ao SLR haja intrusão salina, afectando as explorações agrícolas locais, nomeadamente a produção de cereais, contaminando reservas de água potável com água salgada. Por conseguinte, para futuros estudos recomenda-se que em modelos de dinâmica sedimentar de rios associados à subida do nível médio das águas do mar seja incluído o parâmetro da salinidade.





## Bibliografia

ARH Centro. (2012a). Caracterização Geral e Diagnóstico - Climatológica. *Plano de Gestão das Bacia Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis - Integrados na Região Hidrográfica 4*. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território.

ARH Centro. (2011). Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica dos rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4. *Anexo IV - Fichas de Caracterização para Efeitos de Participação Pública*. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território.

ARH Centro. (2012b). Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica dos rios Vouga, Mondego e Lis Integrados na Região Hidrográfica 4. *Avaliação Ambiental Estratégica - Relatório Ambiental*. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território.

ARH Centro. (2012c). Relatório Síntese. *Plano de Gestão das Bacias Hidrográficas dos rios Vouga, Mondego e Lis*. Ministério da Agricultura, Mar, Ambiente e Ordenamento do Território.

Associated Press. (12 de Maio de 2014). CTV. Obtido em 12 de Janeiro de 2015, de CTV - News : <http://www.ctvnews.ca/sci-tech/scientists-warn-of-rising-sea-levels-as-huge-antarctic-ice-sheet-slowly-melts-1.1817870>

Aves de Portugal. (2014). *Estuário do Mondego*. Obtido em Janeiro de 2015, de avesdeportugal.info: <http://www.avesdeportugal.info/sitestumondego.html>

Bamber, J., Riva, R., Vermeersen, B., & LeBrocq, A. (2009). Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic ice sheet. *Science*, pp. 901-903.

Berardo, C. (Dezembro de 2006). *Distrito de Coimbra: Montemor-o-Velho*. Obtido em Março de 2015, de Origens.pt: <http://www.origens.pt/explorar/doc.php?id=2532>

Carmo, J. S. (2004). *Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

CH2MHill. (2014). *Flood Modeller Suite - Products*. Obtido em Fevereiro de 2015, de Flood Modeller: <https://www.floodmodeller.com/en-us/products/>

Conde, R. A. (2007). Análises de Sensibilidade em Modelação Numérica de Escoamentos em Leito Móvel com HEC-RAS. Aplicação ao rio Mondego. *Dissertação para a Obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil*. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.

Cunge, J. A., Holly, F. M., & Verwey, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Bath, Reino Unido: Pitman.

Cunha, L., & Almeida, A. C. (2008). António Ferreira Soares e a Geomorfologia do Baixo Mondego. *A Terra: Conflitos e Ordem*, 17-24.

Cunha, L., Soares, A. F., Tavares, A., Almeida, A. C., & Santos, J. G. (1999). Intervenções recentes e avaliações de impactes ambientais no Baixo Mondego. *Cadernos de Geografia*, pp. 39-52.

de Vries, M. (1977). Modelling for Sediment Transport: Link in a Chain. *Lecture presented at the XVIIth Congress of the International Association for Hydraulic Research, Report No. 77-1*, p. 10. Baden-Baden.

Duarte, A. A., Vieira, J. M., Neto, J. M., & Pardal, M. A. (2008). Monitorização da Hidrodinâmica e da Qualidade da Água do Estuário do Rio Mondego. *Engenharia Civil - Universidade do Minho*, 33, pp. 68-74.

Fernandez, P., Mourato, S., & Moreira, M. (2010). Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. *Associação Portuguesa de Recursos Hídricos*, pp. 63-73.

Ferreira, J. F., & Cunha, L. V. (1970). *The Regulation of Mondego River - Study of sediment discharge in prototype and description of the help given by a mathematical and a physical model in the solution of the problem*. Lisbon: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Greenpeace. (2010). *O que fazemos - Campanha internacional dos Oceanos - Aquecimento global*. Obtido em Agosto de 2014, de Greenpeace Portugal: <http://www.greenpeace.org/portugal/pt/O-que-fazemos/oceanos/aquecimento-global/>

Gregory, J. (2013). Projections of sea level rise. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Working Group I contribution to the Fifth IPCC Assessment Report.

Haldar, S. K. (2013). *Introduction to Minerology and Petrology*. Amsterdão : Elsevier.

Hidroprojecto. (1977). Regularização do Baixo Mondego. Projecto do Leito Central. Lisboa.

Hidroprojecto. (1986). Visita às Obras do Mondego. Universidade Nova de Lisboa.

Holling, C. S. (1994). An Ecologist's view of the Malthusian Conflict. In K. Lindahl-Liessling, & H. LandBerg, *Population, Economic Development and the Environment*. Nova Iorque: Oxford University Press.

IPCC. (2013). *AR5 - Fifth Assessment Report*. IPCC.

IPMA. (2014). *Despacho n.º 3244/2014*. Lisboa: Diário da República, 2.ª série — N.º 41.

Lemos, A. F. (1996). *Mecânica dos Meios Contínuos*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico.

- Lencastre, A. (2003). *Hidráulica Urbana e Industrial. Volume II*. LNEC.
- Lencastre, A., & Franco, F. M. (2010). *Lições de Hidrologia*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- LNEC. (2012). Estudo das Inundações do rio Mondego a jusante da confluência do rio Ceira. *Departamento de Hidráulica e Ambiente - Relatório 333*. Lisboa.
- Lopes, C. L., Silva, P. A., Dias, J., Rocha, A., Picado, A., Plecha, S., et al. (2011). Local sea level change scenarios for the end of the 21 st century and potential physical impacts in the lower Ria de Aveiro (Portugal). *Continental Shelf Research*, 31 , 1515-1526.
- Louro, S., & Lourenço, L. (Dezembro de 2005). O comportamento hdrológico do rio Mondego perante valores de precipitação intensa em Coimbra. *Territorium* , pp. 19-27.
- Martin, J. L., & McCutcheon, S. C. (1999). *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, CRC Press, Inc.
- Mendes, R., Vaz, N., & Dias, J. M. (2013). Potential impacts of the mean sea level rise on the hydrodynamics os the Douro river estuary. *Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65* , 1951-1956.
- MIKE Powered by DHI technologies. (2014). *MIKE Powered by DHI*. Obtido em Janeiro de 2015, de Products - MIKE 11 - Sediments: <http://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-11/sediments>
- NEDECO. (1973). *Río Magdalena and Canal del Dique Survey*. Colombia: Misión Técnica Colombo-Holandesa.
- Oliver-Smith, A. (2009). *Sea Level Rise and the Vulnerability of Coastal Peoples - Responding to the Local Challenges of Global Climate Change in th 21st Century*. Alemanha: InterSecTions - Publication Series of UNU-EHS.
- Pereira, P., Vale, C., Ferreira, A. M., Pereira, E., Pardal, M. A., & Marques, J. C. (Fevereiro de 2007). Seasonal Variation of Surface Sediments Composition in Mondego River Estuary. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxis/Hazardous Substances and Environmental Engineering* , p. 14.
- Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Mondego (1998). 1ª Fase – Análise e Diagnóstico da Situação Actual: Volume II - Enquadramento.
- Prins, A., & de Vries, M. (1971). *On dominant discharge concepts for rivers*. Delft University of Technology and Delft Hydraulics Laboratory, Publicação N°92, Holanda.
- Quarteroni, A. (2009). *Numerical Models for Differential Problems*. Itália: Springer.

Rahmstorf, S. (Janeiro de 2007). A Semi-Empirical Approach to Sea-Level Rise. *Science* , 315, pp. 368-370.

RealClimate. (Outubro de 2013). *Sea level in the 5th IPCC report*. Obtido em Dezembro de 2014, de RealClimate - Climate science from climate scientists: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2013/10/sea-level-in-the-5th-ipcc-report/>

Ribeiro, J. L. (2001). *Zonas húmidas costeiras e ordenamento territorial: o caso do estuário do Mondego*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

Rodrigues, A. C. (1986). *COBRA - Um Modelo para a Simulação de Processos Hidrodinâmicos em Canais Simples. Manual de utilização*. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.

Rodrigues, A. C. (2010). Navegabilidade do rio Tejo. *Sessão de debate organizada pela APRH e pela ARH-Tejo*. Lisboa: LNEC.

Rodrigues, A. C., & Fonseca, J. L. (2012). Aula 5 - Erosão, Sedimentos e Transporte Sólido. *Hidráulica Fluvial e Aproveitamentos Hidráulicos* . (G. d.-S.-D. Ambiente, Ed.) Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.

Silverfrost. (Maio de 2014). *Silverfrost*. Obtido em Novembro de 2014, de FTN95: Fortran 95 for Windows: [http://www.silverfrost.com/11/ftn95\\_overview.aspx](http://www.silverfrost.com/11/ftn95_overview.aspx)

SNIRH . (2013). *Dados Sintetizados - Recursos Hídricos* . Obtido em Junho de 2014, de Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos: <http://snirh.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.2>

Soares, J. M. (1995). Modelação Matemática da Qualidade da Água: aplicação do modelo simqualao Rio Mondego. *Dissertação para a Obtenção de Grau de Mestre em Engenharia Civil*. Lisboa: Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa.

Stocker, T., Dahe, Q., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., & Mindgley, P. (2010). *IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities* . Kuala Lumpur, Malaysia: IPCC.

Tanguy, J.-M. (2010). *Physical Processes and Measurement Devices: Environmental Hydraulics*. França: Wiley - ISTE.

US Army Corps of Engineers. (2014). *Software: HEC-RAS*. Obtido em Setembro de 2014, de Hydrologic Engineering Center: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

Waugh, D. (2009). *Geography: An Integrated Approach*. Inglaterra: Nelson Thornes.

Poster: “The Impact of the Sea Level Rise in the Hydromorphology of Alluvial Rivers” no *Particles in Flows Summer School and Workshop*, Agosto 25-31, 2014, Praga, República Checa.

Publicação: Silva, J.R.; Rodrigues, A. C., “The Impact of the Sea Level Rise in the Hydromorphology of Alluvial Rivers”, *Book of Abstracts: Particles in Flows Summer School and Workshop 2014*, Praga, República Checa.



# Anexos

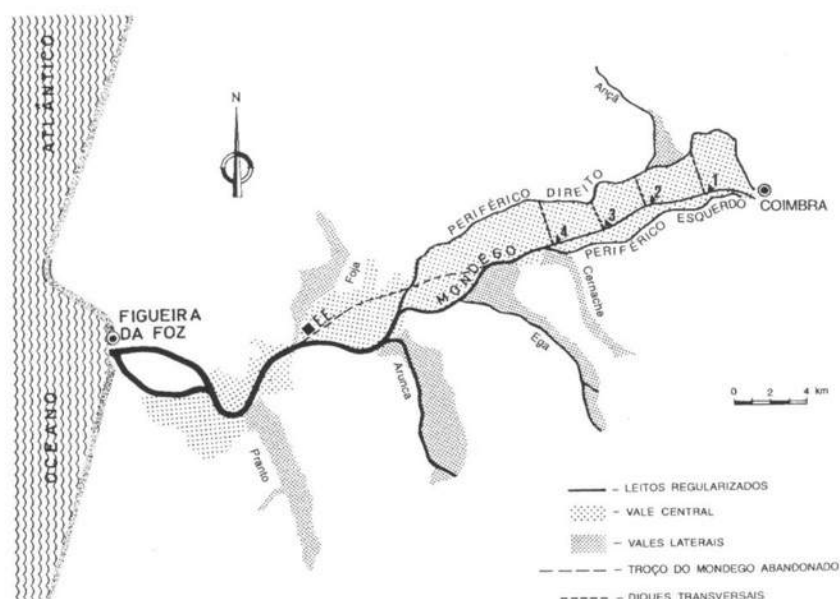
## Anexo I



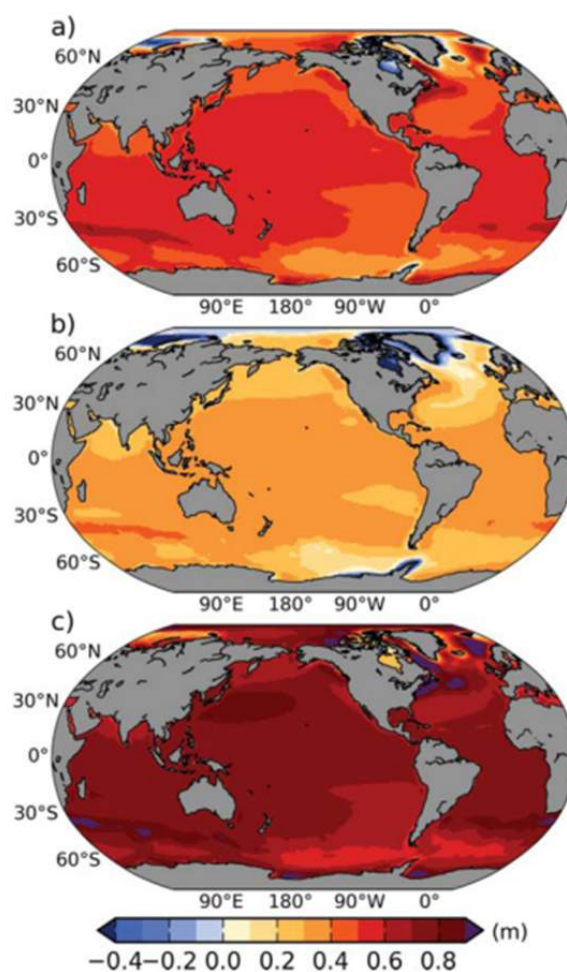
**Figura 1** Exemplo de paisagem do Baixo Mondego, Montemor-o-Velho (Berardo, 2006).



**Figura 2** Ilha da Morracheira que fica no meio do estuário do Mondego e é principalmente composta por sapais, caniçais, arrozais e salinas (Aves de Portugal, 2014).



**Figura 3** Leitos regularizados do Baixo Mondego (Hidroprojecto, 1986).



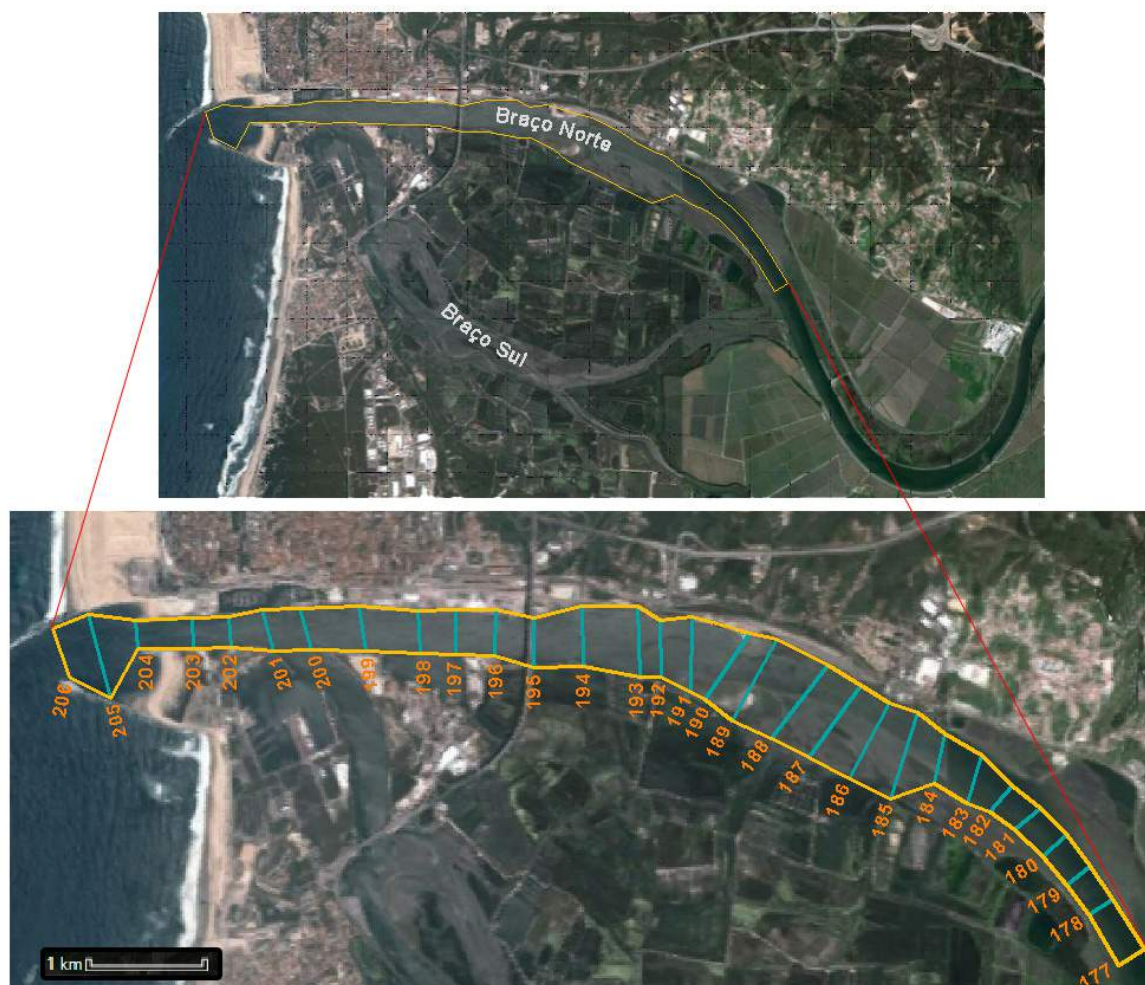
**Figura 4** Mapa mundial das mudanças no nível do mar para o período de 2081 a 2100, (a) valores médios, (b) valores mínimos e (c) valores máximos, todos para o cenário moderado RCP4.5 (IPCC, 2013).



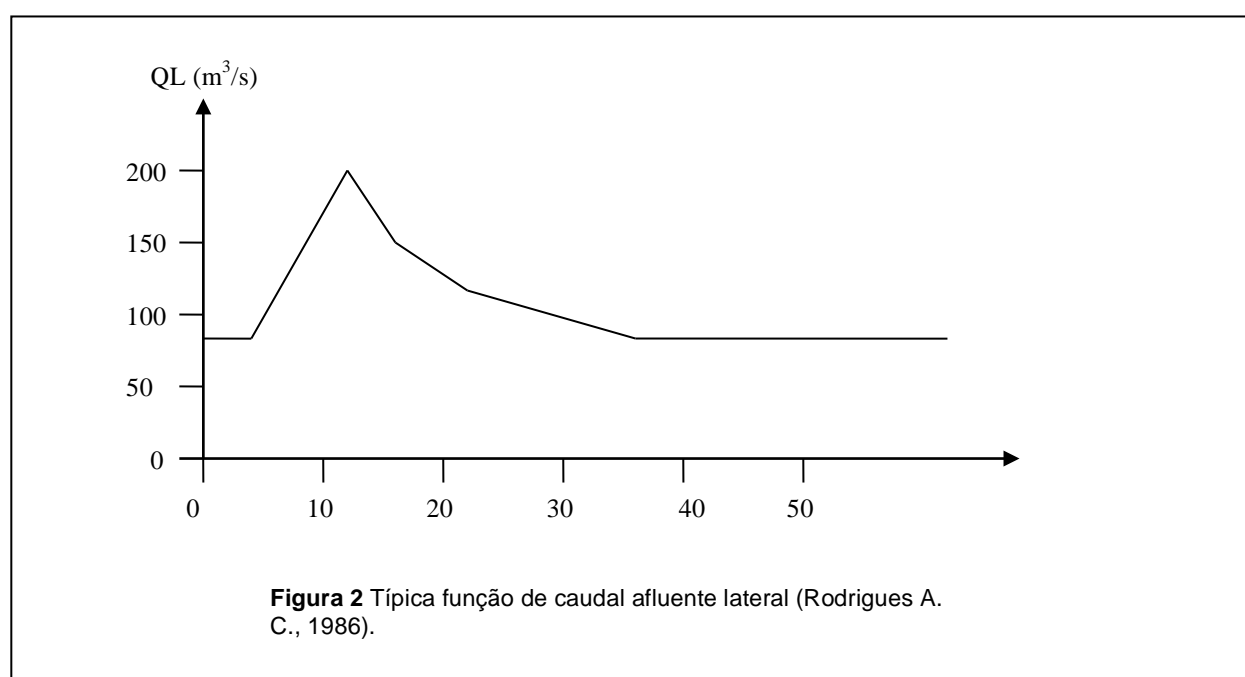
## Anexo II

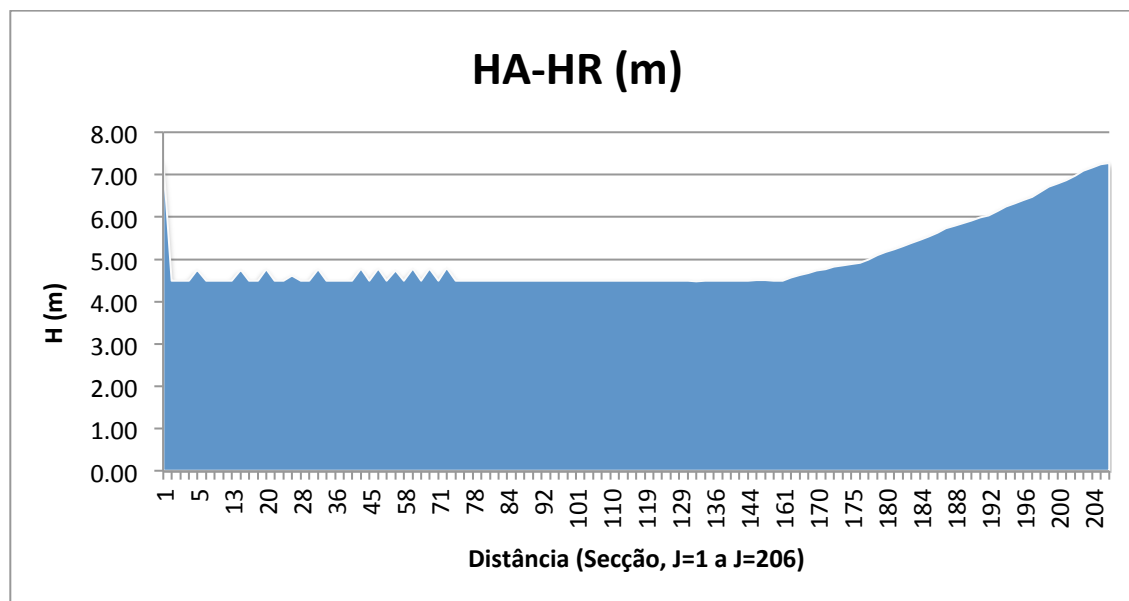
**Tabela 1** Análise comparativa de alguns modelos de transporte sólido. Adaptado de (Conde, 2007).

Características		Fluvial-12	TABS-2	USGS	D-O-T	GSTARS
Discretização e Formulação	Regime variável/hidrograma por degraus	S/S	S/S	S/S	N/S	N/S
	Unidimensional / quasibidimensional	S/S	N/N	N/N	S/S	S/S
	Bidimensional / Altura média do escoamento	N	S	S/S	N	N/S
	Leito / Margens deformáveis	S/S	S/N	S/N	S/S	S/S
	Transporte sólido por fracção granulométrica	S	S	N	S	S
	Malha não uniforme	S	S	S	S	S
Esquema de resolução numérica	Método padrão	S	N	N	S	S
	Diferenças finitas	N	N	S	S	S
	Elementos finitos	N	S	N	N	N
Potencialidades do modelo	Hidrogramas de caudais líquido e sólido na fronteira de montante	S	S	S	S	S
	Especificação da cota da superfície livre na fronteira de jusante	S	S	N	S	S
	Sedimentação em leito de cheia	N	S	N	N	N
	Transporte sólido em suspensão / total	S/N	S/N	N/S	N/S	N/S
	Transporte do material do fundo	S	N	N	N	S
	Sedimentos coesivos	N	S	S	N	S
	Gradação do material do leito	S	N	N	S	S
	Erosão fluvial das margens do curso de água	S	N	N	S	S
	Ruptura das margens sob acção da gravidade	N	N	N	S	N
	Trechos rectilíneos e prismáticos / irregulares e não prismáticos	S/N	S/S	N/N	S/S	S/S
	Rede fluvial simples / múltipla	S/N	S/S	N/N	N/N	N/N
	Pilares de pontes	N	S	N	N	N
	Albufeiras	S	N	N	N	S
Apoio ao utilizador	Documentação sobre o modelo	S	S	S	S	S
	Manual do utilizador actualizado / Apoio técnico ao utilizador	S/N	S/N	S/N	N/N	S/N

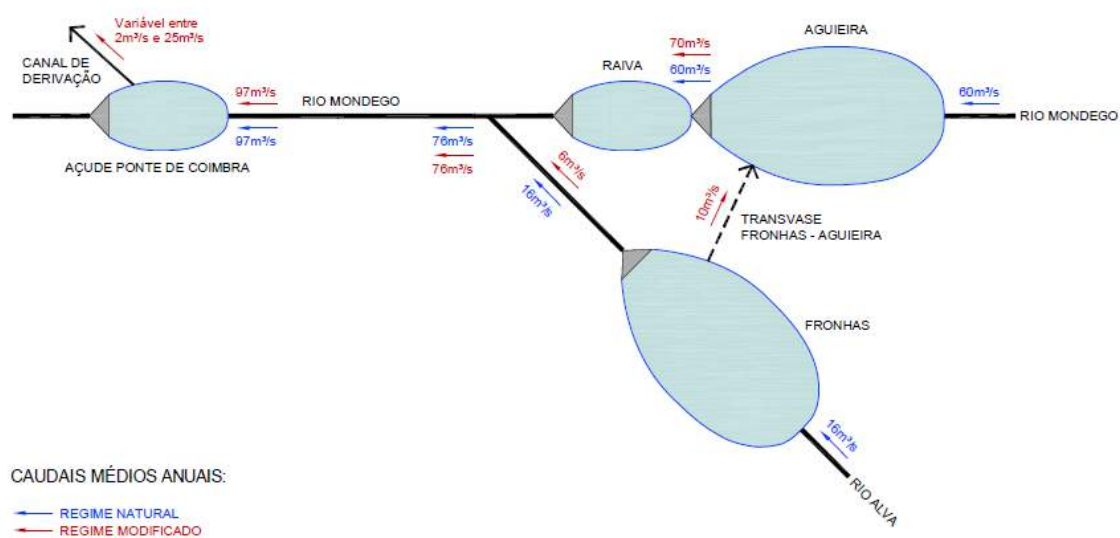


**Figura 1** Ortofotomapa com secções.

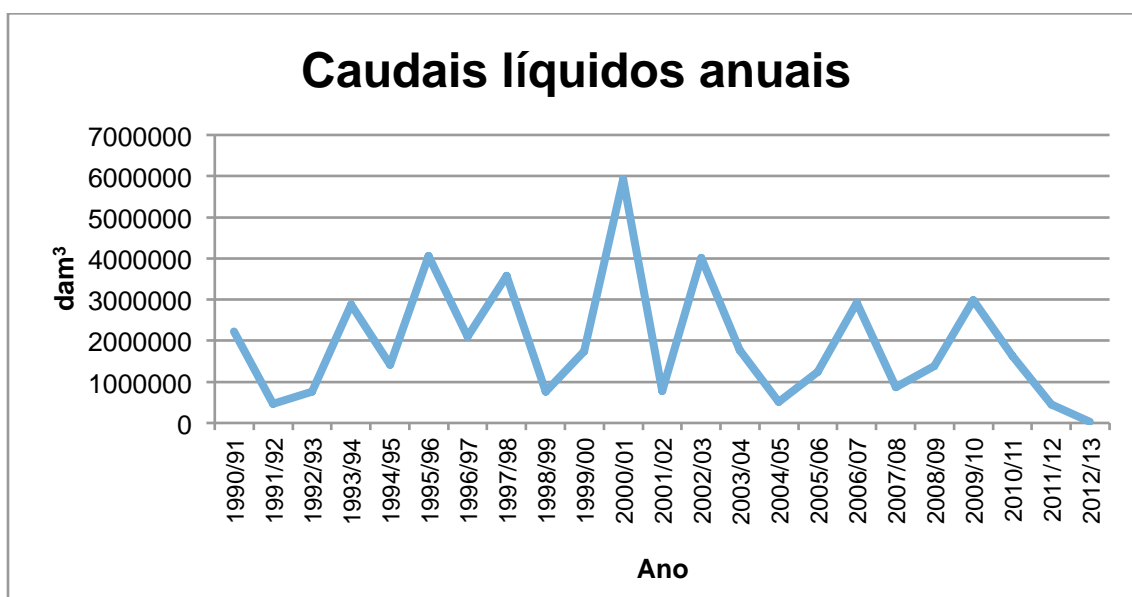




**Figura 3** Variação de alturas de água ao longo do perfil longitudinal.



**Figura 4** Esquema do Sistema Fronhas – Agueira – Açude de Coimbra com caudais médios anuais (ARH Centro, 2012c).



**Figura 5** Escoamentos anuais médios estimados desde o Açude-Ponte de Coimbra até à foz. Valores baseados nos dados fornecidos pelas estações do Açude de Coimbra e Ponte Juncais de 1990 a 2013 (SNIRH , 2013).

**Tabela 2** Caudais do rio Mondego (Hidroprojecto, 1986).

Antes das Obras Hidráulicas			
	Caudal		
Tempo (dias)	Ano Médio (m <sup>3</sup> /s)	Ano Húmido (m <sup>3</sup> /s)	Ano Seco (m <sup>3</sup> /s)
10	490	825	245
50	175	325	75
100	85	210	40
200	20	25	5
Q Médio Anual	84	155	37
Q Dominante	370	490	230
S (l/s)	7,5		
Depois das Obras Hidráulicas			
	Caudal		
Tempo (dias)	Ano Médio (m <sup>3</sup> /s)	Ano Húmido (m <sup>3</sup> /s)	Ano Seco (m <sup>3</sup> /s)
10	500	700	160
50	175	360	58
100	85	240	30
200	18	40	5
Q Médio Anual	72	145	27
Q Dominante	340	440	150
S (l/s)	1,5		

**Tabela 3** Caudais dos afluentes laterais (Hidroprojecto, 1986).

	Caudal			
	Médio Anual (m <sup>3</sup> /s)	Sólido Médio Anual (l/s)	Dominante Médio (m <sup>3</sup> /s)	De Cheia (T = 25 anos) (m <sup>3</sup> /s)
<b>R. Ançã</b>	1,1	0,16	2,8	325
<b>Rib. Cernache</b>	0,5	0,02	1,8	175
<b>R. Ega</b>	1,9	0,04	7,1	70
<b>R. Arunca</b>	4,9	0,18	15,9	895
<b>R. Foja</b>	1,3	0,17	2,6	135
<b>R. Pranto</b>	1,9	0,27	5,1	315

**Exemplo 1** – Dados de entrada. Cenário C9.

## GENERAL DATA

+ \_\_\_\_\_

GRID FROM J= 1 TO J= 206  
 SIMULATION OF 878400 TIME STEPS OF 1.00 UNITS  
 OUTPUT PRINTED EVERY 720 TIME STEPS  
 PRECISION COEFFICIENT IN DIFFERENCE SCHEME= 0.001  
 ACCELERATION DUE TO GRAVITY= 9.81 M/S\*\*2  
 NUMBER OF LATERAL INFLOW SOURCES= 6  
 NUMBER OF STRUCTURES= 11  
 MEAN GRAINSIZE= 0.0022 METERS  
 POROSITY= 0.300  
 SEA LEVEL RISE= 8.0 mm/year

## UNITS

+ \_\_\_\_\_

LEVELS IN METERS  
 DISCHARGES IN M\*\*3/SEC  
 TIME IN HOURS

## GRIDPOINT AND SECTION DATA

+ \_\_\_\_\_

GRIDPOINT	HR	HA	WR	WA	CHEZY	DX
1	11.97	19.30	152.00	190.00	40.00	190.00
2	11.91	16.41	110.00	135.00	40.00	220.00
3	11.70	16.34	88.00	110.00	40.00	120.00
4	11.47	16.27	88.00	110.00	40.00	110.00
5	11.27	16.02	88.00	110.00	40.00	177.97
6	11.21	15.71	88.00	110.00	40.00	177.97
7	11.15	15.65	88.00	110.00	40.00	128.13
10	10.87	15.43	105.77	127.77	40.00	208.13
13	10.43	15.22	88.00	110.00	40.00	110.00
14	10.22	14.97	88.00	110.00	40.00	177.46
15	10.16	14.66	88.00	110.00	40.00	114.37
19	9.92	14.39	88.00	110.00	40.00	110.00
20	9.69	14.16	88.00	110.00	40.00	200.00
21	9.32	13.82	88.00	110.00	40.00	200.00

26	8.98	13.48	88.00	110.00	40.00	233.00
27	8.48	13.10	88.00	110.00	40.00	187.14
28	8.35	12.85	88.00	110.00	40.00	120.00
31	8.10	12.65	88.00	110.00	40.00	110.00
32	7.85	12.42	88.00	110.00	40.00	188.10
35	7.45	11.94	88.00	110.00	40.00	188.10
36	7.38	11.87	94.48	116.48	40.00	188.10
37	7.30	11.79	88.00	110.00	40.00	188.10
38	7.23	11.73	88.00	110.00	40.00	233.00
39	6.73	11.51	88.00	110.00	40.00	200.50
45	6.34	10.84	88.00	110.00	40.00	233.00
46	5.84	10.62	88.00	110.00	40.00	206.40
52	5.48	9.98	88.00	110.00	40.00	233.00
53	4.98	9.72	88.00	110.00	40.00	226.43
58	4.60	9.10	88.00	110.00	40.00	233.00
59	4.10	8.88	88.00	110.00	40.00	199.18
65	3.73	8.23	88.00	110.00	40.00	233.00
66	3.23	8.01	88.00	110.00	40.00	200.64
71	2.89	7.39	88.00	110.00	40.00	233.00
72	2.39	7.18	88.00	110.00	40.00	211.64
73	2.33	6.83	93.00	115.00	40.00	234.70
75	2.18	6.68	89.41	111.41	40.00	250.33
78	1.95	6.45	91.77	113.77	40.00	352.30
79	1.85	6.35	101.83	123.83	40.00	352.30
80	1.74	6.24	90.43	112.43	40.00	355.00
81	1.64	6.14	90.64	112.64	40.00	248.17
84	1.41	5.91	132.19	154.19	40.00	248.17
87	1.19	5.69	89.50	111.50	40.00	255.00
90	0.96	5.46	89.78	111.70	40.00	352.30
91	0.86	5.36	97.71	119.71	40.00	352.30
92	0.76	5.26	89.40	111.40	40.00	200.00
93	0.70	5.20	105.40	127.40	40.00	216.40
94	0.54	5.13	91.40	113.40	40.00	216.40
98	0.39	4.89	91.40	113.40	40.00	207.00
101	0.21	4.71	115.44	137.44	40.00	207.00
104	0.03	4.53	91.51	113.51	40.00	236.25
108	-0.23	4.27	91.51	113.51	40.00	239.00
109	-0.30	4.20	103.39	125.39	40.00	202.50
110	-0.48	4.14	124.31	146.31	40.00	202.50
115	-0.63	3.87	93.52	115.52	40.00	202.50
117	-0.75	3.75	95.09	117.09	40.00	238.00
118	-0.81	3.69	102.30	124.30	40.00	238.00
119	-0.88	3.62	243.69	265.69	40.00	238.00
120	-0.94	3.56	187.13	209.13	40.00	194.33
123	-1.10	3.40	158.29	180.29	40.00	206.43
126	-1.27	3.23	120.58	142.58	40.00	231.00
129	-1.46	3.04	120.58	142.58	40.00	231.00
130	-1.52	2.98	116.95	138.95	40.00	221.00
133	-1.70	2.78	95.34	117.34	40.00	193.20
134	-1.76	2.74	95.49	117.49	40.00	243.70
136	-1.89	2.61	102.14	124.14	40.00	243.70
138	-2.02	2.48	95.11	117.11	40.00	217.55
142	-2.26	2.24	97.57	119.57	40.00	261.20
143	-2.33	2.17	109.84	131.84	40.00	261.30
144	-2.40	2.10	98.93	129.93	40.00	226.26
149	-2.57	1.94	110.00	132.04	40.00	194.55
153	-2.69	1.82	125.89	147.93	40.00	194.55
157	-2.80	1.70	114.00	136.00	40.00	219.68
161	-2.93	1.57	119.06	141.06	40.00	208.05
165	-3.06	1.51	139.92	162.20	40.00	193.15
167	-3.12	1.51	149.96	172.48	40.00	193.15
168	-3.16	1.51	182.96	205.64	40.00	214.15
170	-3.22	1.51	217.54	240.56	40.00	214.20
171	-3.25	1.51	205.85	228.89	40.00	214.20
173	-3.32	1.51	157.68	181.00	40.00	214.20
174	-3.35	1.51	146.44	169.88	40.00	214.20

175	-3.38	1.51	142.46	166.02	40.00	214.20
176	-3.41	1.51	142.00	165.68	40.00	224.00
178	-3.48	1.51	142.20	166.16	40.00	224.00
179	-3.61	1.51	159.27	171.16	40.00	224.00
180	-3.66	1.51	169.25	189.57	40.00	196.49
182	-3.80	1.51	197.29	239.39	40.00	223.88
184	-3.95	1.51	215.17	310.61	40.00	224.66
185	-4.03	1.51	203.02	279.84	40.00	234.66
186	-4.12	1.51	208.89	294.10	40.00	242.72
187	-4.22	1.51	210.44	297.47	40.00	295.34
189	-4.34	1.51	220.94	323.12	40.00	180.22
190	-4.41	1.51	242.46	275.32	40.00	211.03
191	-4.47	1.51	221.45	312.98	40.00	184.12
192	-4.52	1.51	219.28	278.77	40.00	139.40
193	-4.63	1.51	209.94	289.15	40.00	334.06
194	-4.74	1.51	236.54	323.58	40.00	300.01
195	-4.82	1.51	224.49	305.10	40.00	232.02
197	-4.97	1.51	208.80	225.04	40.00	224.18
198	-5.08	1.51	210.05	228.28	40.00	337.76
200	-5.27	1.51	196.60	212.85	40.00	225.02
203	-5.42	1.51	137.98	168.73	40.00	332.95
204	-5.66	1.51	132.10	161.09	40.00	243.12
205	-5.73	1.51	204.51	275.05	40.00	218.09
206	-5.77	1.51	198.66	261.58	40.00	1.00

LEFT BOUNDARY DATA

+\_\_\_\_\_

Q e S DADOS NA FRONTEIRA DE MONTANTE

BOUNDARY VALUE: 340.00

BOUNDARY VALUE: 0.0015

RIGHT BOUNDARY DATA

+\_\_\_\_\_

H DADO NA FRONTEIRA DE JUSANTE

BOUNDARY VALUE: 0.00

AFLUENTES LATERAIS

+\_\_\_\_\_

LATERAL INFLOW 1 IN GRID SECTION 73

DISCHARGE (M\*\*3/S): 1.80

SEDIMENT (M\*\*3/S): 0.20E-04

LATERAL INFLOW 2 IN GRID SECTION 94

DISCHARGE (M\*\*3/S): 7.10

SEDIMENT (M\*\*3/S): 0.40E-04

LATERAL INFLOW 3 IN GRID SECTION 109

DISCHARGE (M\*\*3/S): 2.80  
 SEDIMENT (M\*\*3/S): 0.16E-03

LATERAL INFLOW 4 IN GRID SECTION 119

DISCHARGE (M\*\*3/S): 15.90  
 SEDIMENT (M\*\*3/S): 0.18E-03

LATERAL INFLOW 5 IN GRID SECTION 144

DISCHARGE (M\*\*3/S): 2.60  
 SEDIMENT (M\*\*3/S): 0.17E-03

LATERAL INFLOW 6 IN GRID SECTION 200

DISCHARGE (M\*\*3/S): 5.10  
 SEDIMENT (M\*\*3/S): 0.27E-03

#### STRUCTURES

+\_\_\_\_\_

STRUCT.NUMB. 1 IN GRID SECTION 4 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 2 IN GRID SECTION 13 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 3 IN GRID SECTION 19 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 4 IN GRID SECTION 26 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 5 IN GRID SECTION 31 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 6 IN GRID SECTION 38 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 7 IN GRID SECTION 45 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 8 IN GRID SECTION 52 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 9 IN GRID SECTION 58 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 10 IN GRID SECTION 65 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M

STRUCT.NUMB. 11 IN GRID SECTION 71 TYPE 3  
 SOLEIRA DE FIXACAO DO FUNDO COM PERDA DE CARGA DE: 0.25 M



### Anexo III

**Tabela 1** Declives das linhas de tendência do fundo inicial, da margem inicial e do fundo móvel e superfície livre de cada um dos cenários para a simulação de 100 anos. Valores obtidos através da recta de regressão linear.

DECLIVES		
	Fundo Inicial	Margem Inicial
	0,000368	0,000344
	Fundo	Superfície Livre
<b>C1</b>	0,000279	0,000288
<b>C2</b>	<b>0,000290</b>	<b>0,000297</b>
<b>C3</b>	0,000287	0,000293
<b>C4</b>	0,000282	0,000292
<b>C5</b>	0,000277	0,000285
<b>C6</b>	0,000289	0,000294
<b>C7</b>	0,000285	0,000290
<b>C8</b>	0,000281	0,000289
<b>C9</b>	0,000274	0,000281
<b>C10</b>	0,000285	0,000290
<b>C11</b>	0,000282	0,000286
<b>C12</b>	0,000277	0,000285
<b>C13</b>	0,000273	0,000278
<b>C14</b>	0,000284	0,000287
<b>C15</b>	0,000281	0,000282
<b>C16</b>	0,000276	0,000282
<b>C17</b>	<b>0,000269</b>	<b>0,000274</b>
<b>C18</b>	0,000281	0,000283
<b>C19</b>	0,000277	0,000279
<b>C20</b>	0,000272	0,000279

Figura 1 Evolução do Baixo Mondego num horizonte temporal de 100 anos para 4 cenários com SLR = 4 mm/ano.

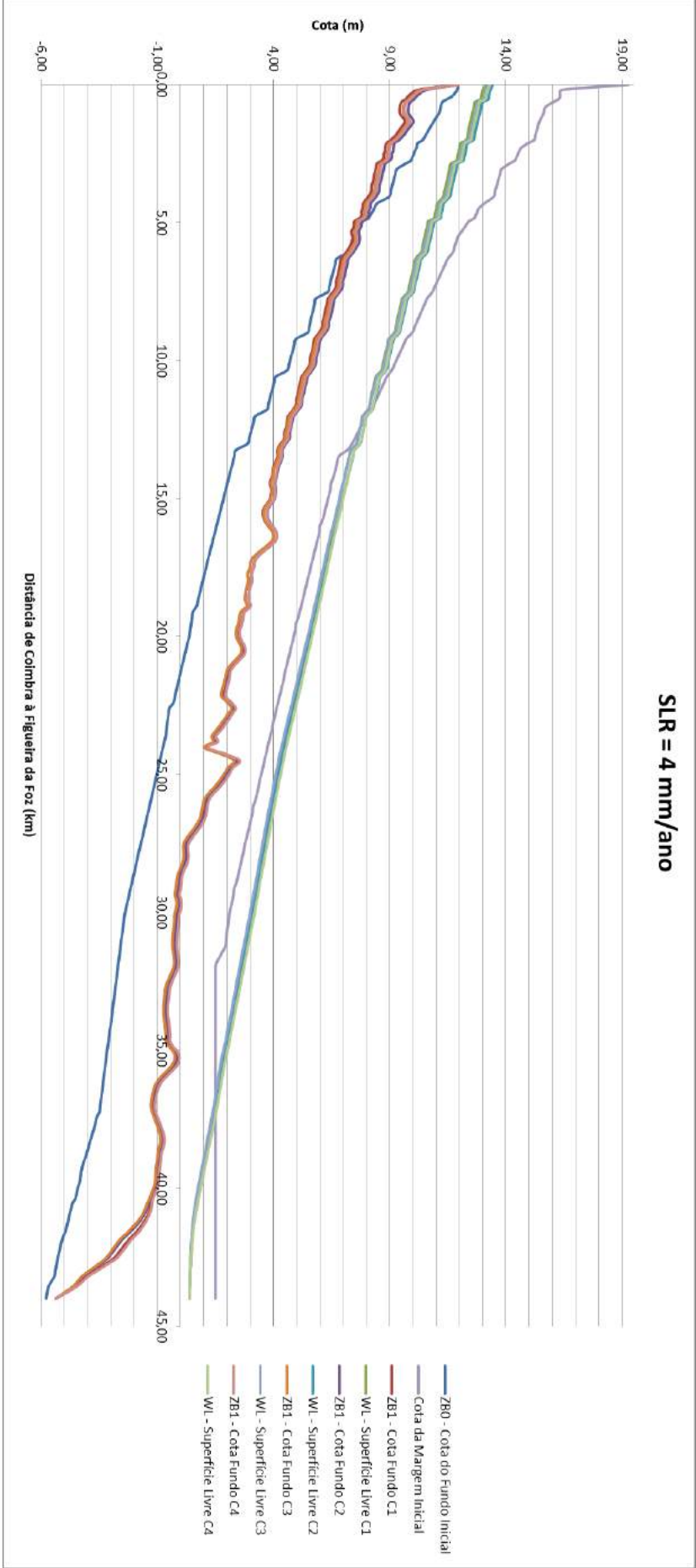


Figura 2 Evolução do Baixo Mondego num horizonte temporal de 100 anos para 4 cenários com SLR = 6 mm/ano.

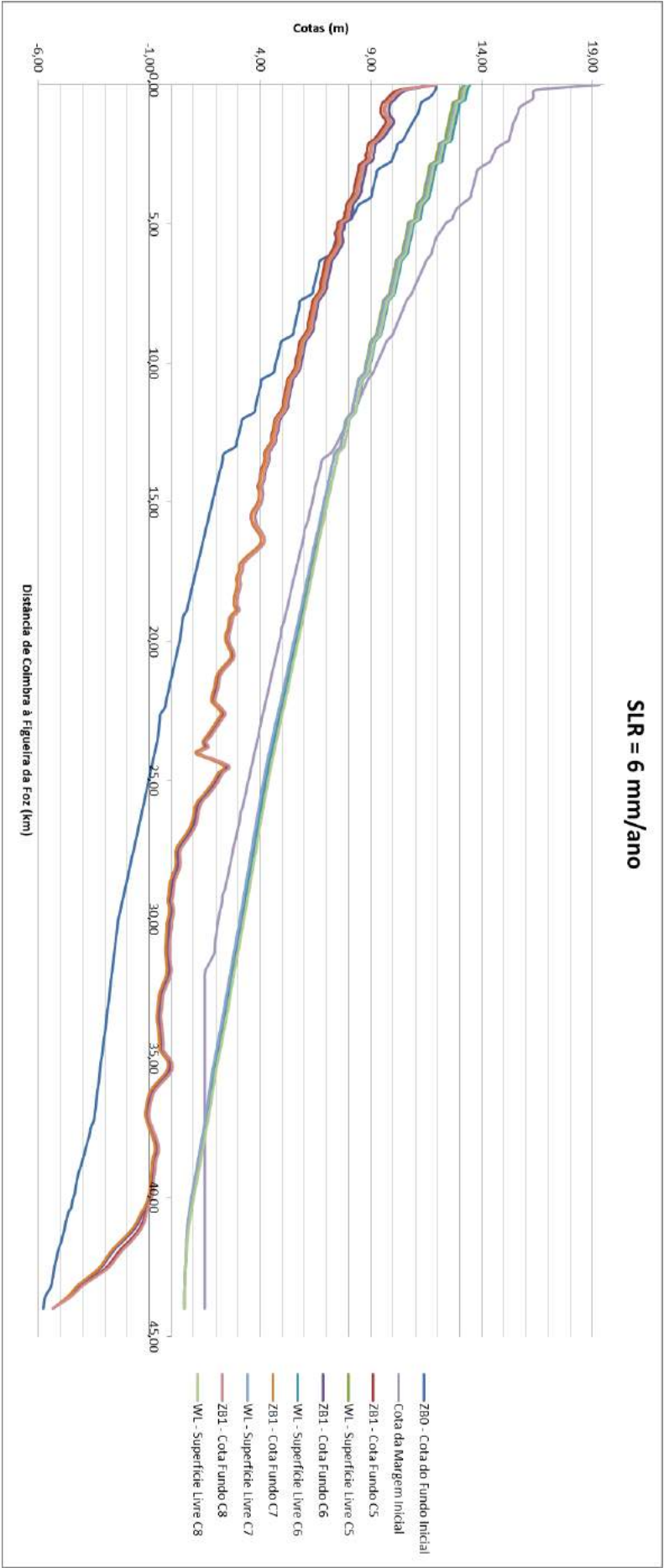


Figura 3 Evolução do Baixo Mondego num horizonte temporal de 100 anos para 4 cenários com SLR = 8 mm/ano.

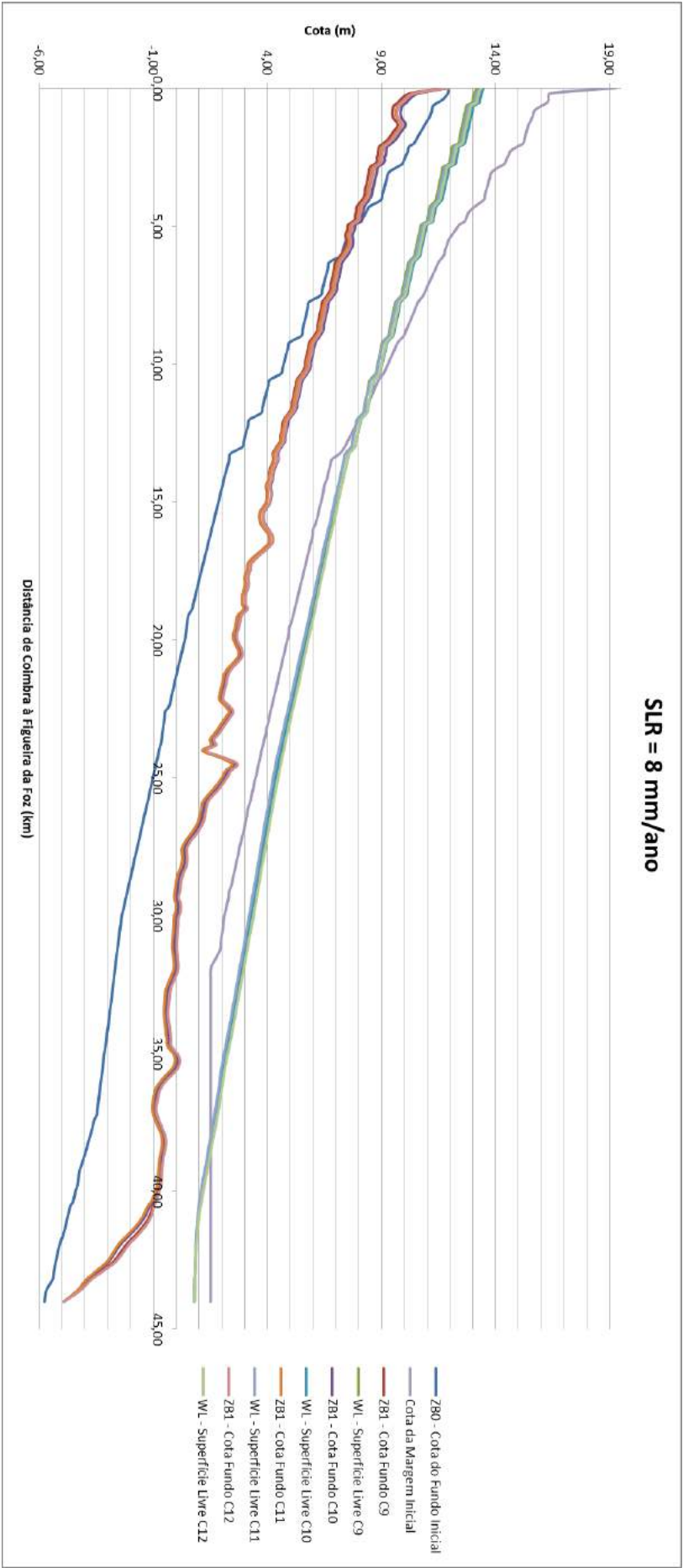


Figura 4 Evolução do Baixo Mondego num horizonte temporal de 100 anos para 4 cenários com SLR = 10 mm/ano.

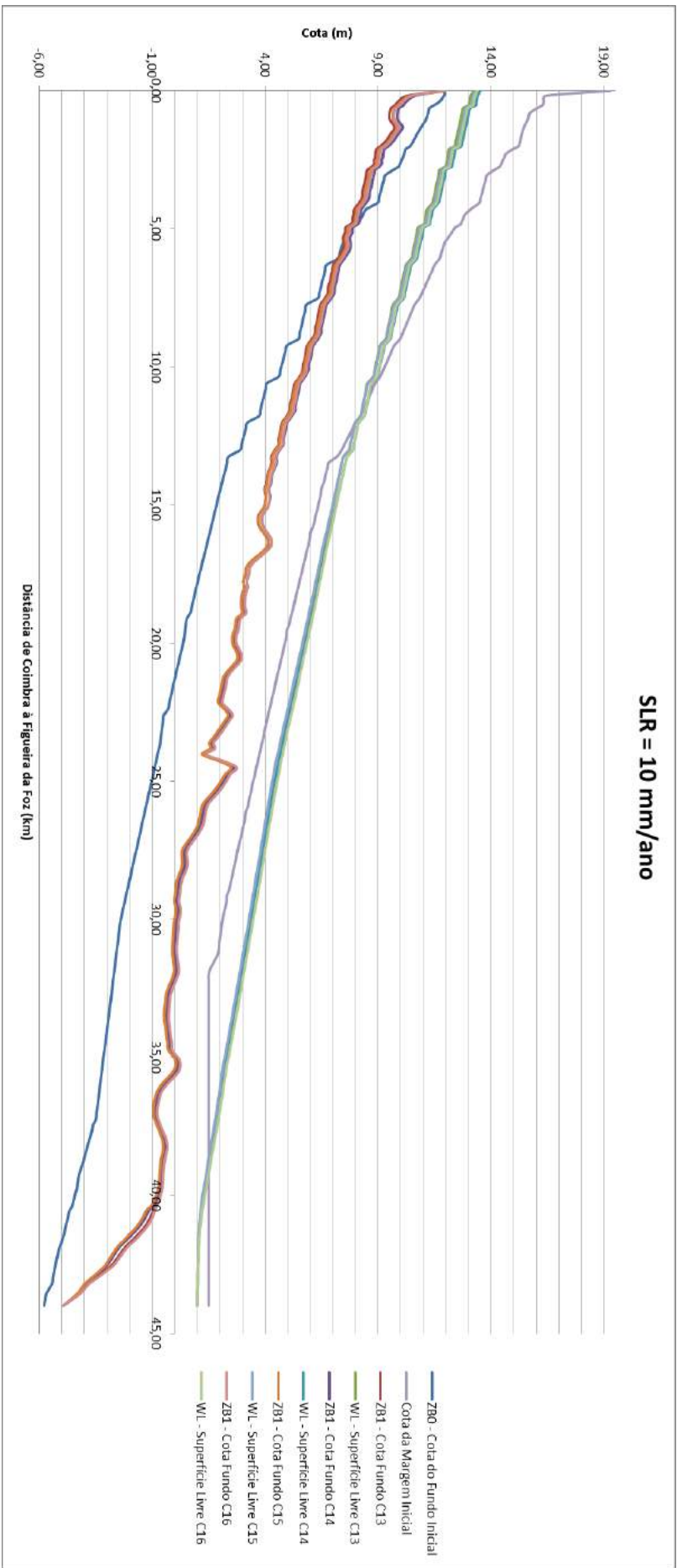
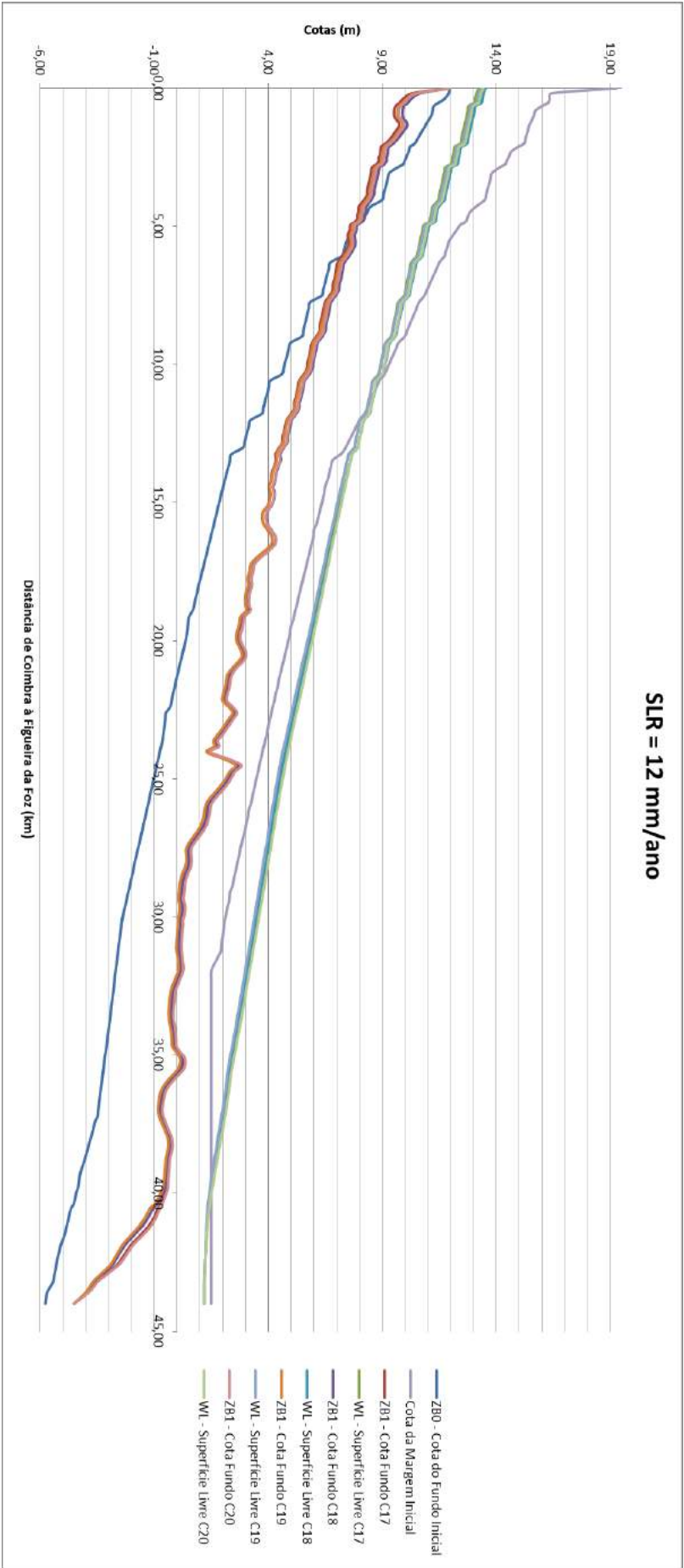


Figura 5 Evolução do Baixo Mondego num horizonte temporal de 100 anos para 4 cenários com SLR = 12 mm/ano.



**Tabela 2** Cotas de fundo (100 anos).

(m)	Cota de fundo (ZB)					
	J			P/C. fundo inicial		
	1	2	206	DeltaZ J2 J1	ΔZB J2	ΔZB J206
ZB0	11,97	11,91	-5,77	-0,06		
ZB1 C1		10,22	-5,35	-1,75	-1,69	0,42
ZB1 C2		10,58	-5,35	-1,39	-1,33	0,42
ZB1 C3		10,37	-5,35	-1,60	-1,54	0,42
ZB1 C4		10,43	-5,35	-1,54	-1,48	0,42
ZB1 C5		10,24	-5,35	-1,73	-1,67	0,42
ZB1 C6		10,60	-5,35	-1,37	-1,31	0,42
ZB1 C7		10,39	-5,35	-1,58	-1,52	0,42
ZB1 C8		10,45	-5,35	-1,52	-1,46	0,42
ZB1 C9		10,26	-4,93	-1,71	-1,65	0,84
ZB1 C10		10,62	-4,93	-1,35	-1,29	0,84
ZB1 C11		10,41	-4,93	-1,56	-1,50	0,84
ZB1 C12		10,47	-4,93	-1,50	-1,44	0,84
ZB1 C13		10,28	-4,93	-1,69	-1,63	0,84
ZB1 C14		10,63	-4,93	-1,34	-1,28	0,84
ZB1 C15		10,42	-4,93	-1,55	-1,49	0,84
ZB1 C16		10,48	-4,93	-1,49	-1,43	0,84
ZB1 C17		10,30	-4,51	-1,67	-1,61	1,26
ZB1 C18		10,65	-4,51	-1,32	-1,26	1,26
ZB1 C19		10,44	-4,51	-1,53	-1,47	1,26
ZB1 C20		10,51	-4,51	-1,46	-1,40	1,26

**Tabela 3** Médias das cotas de fundo e superfície livre com destaque para as médias mais baixas (C3) e mais altas (C20) (100 anos).

Média das Cotas de Fundo				Média da Superfície Livre			
SLR = 4 mm/ano				SLR = 4 mm/ano			
C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
2,88	3,00	2,86	3,02	5,85	5,94	5,83	5,97
SLR = 6 mm/ano				SLR = 6 mm/ano			
C5	C6	C7	C8	C5	C6	C7	C8
2,93	3,05	2,91	3,07	5,92	6,02	5,90	6,04
SLR = 8 mm/ano				SLR = 8 mm/ano			
C9	C10	C11	C12	C9	C10	C11	C12
3,01	3,12	2,98	3,14	6,01	6,10	5,99	6,13
SLR = 10 mm/ano				SLR = 10 mm/ano			
C13	C14	C15	C16	C13	C14	C15	C16
3,06	3,17	3,03	3,19	6,09	6,18	6,06	6,20
SLR = 12 mm/ano				SLR = 12 mm/ano			
C17	C18	C19	C20	C17	C18	C19	C20
3,13	3,24	3,10	3,27	6,18	6,26	6,14	6,30

**Tabela 4** Média de diferença de cotas do fundo do rio entre o ano 0 e ano 100 e média de alturas de água no ano 100, com destaque para os valores mais baixos (C3, C2) e mais elevados (C20, C19).

	Médias (m)	
	$\Delta ZB = ZB1 - ZB0$	$H = WL - ZB1$
<b>C1</b>	1,51	2,969
<b>C2</b>	1,62	<b>2,946</b>
<b>C3</b>	<b>1,49</b>	2,965
<b>C4</b>	1,65	2,950
<b>C5</b>	1,56	2,993
<b>C6</b>	1,67	2,970
<b>C7</b>	1,54	2,990
<b>C8</b>	1,69	2,974
<b>C9</b>	1,63	3,006
<b>C10</b>	1,75	2,983
<b>C11</b>	1,61	3,003
<b>C12</b>	1,77	2,986
<b>C13</b>	1,68	3,032
<b>C14</b>	1,79	3,010
<b>C15</b>	1,65	3,032
<b>C16</b>	1,82	3,012
<b>C17</b>	1,76	3,045
<b>C18</b>	1,87	3,024
<b>C19</b>	1,72	<b>3,047</b>
<b>C20</b>	<b>1,90</b>	3,025



**Tabela 5** Taxas de assoreamento para 100 e 10 anos.

%	Taxas de Assoreamento	
	100 anos	10 anos
C1	4,28	32,52
C2	4,30	32,61
C3	4,30	31,92
C4	4,26	33,09
C5	4,31	32,53
C6	4,33	32,63
C7	4,33	31,93
C8	4,29	33,10
C9	4,35	32,60
C10	4,37	32,69
C11	4,38	32,02
C12	4,33	33,15
C13	4,38	32,62
C14	4,39	32,70
C15	4,40	32,04
C16	4,36	33,16
C17	4,42	32,67
C18	4,43	32,75
C19	4,44	32,10
C20	4,40	33,21

**Tabela 6** Volumes de assoreamento obtidos para o Ano 1 e considerados para o cálculo das taxas anuais de assoreamento (Tabela 9).

Assoreamentos (m <sup>3</sup> )	
Cenário	1 ano
C1	161598
C2	163128
C3	152862
C4	173966
C5	161611
C6	163149
C7	152885
C8	173978
C9	161944
C10	163490
C11	153228
C12	174298
C13	161964
C14	163506
C15	153242
C16	174312
C17	162294
C18	163821
C19	153558
C20	174646

**Tabela 7** Superfície livre. \*Cenários em que WL para J=204 é igual a WL para J=205 e 206 (100 anos).

(m)	Superfície livre (WL)					
	J				$\Delta WL$	
	1	2	205	206	J2 J1	J206 J 205
C1	11,37	11,32	0,40	0,40	-0,05	0,00
C2	11,65	11,59	0,40	0,40	-0,06	0,00
C3	11,46	11,41	0,40	0,40	-0,05	0,00
C4	11,56	11,50	0,40	0,40	-0,06	0,00
C5*	11,41	11,35	0,60	0,60	-0,06	0,00
C6*	11,68	11,62	0,60	0,60	-0,06	0,00
C7*	11,49	11,44	0,60	0,60	-0,05	0,00
C8*	11,59	11,53	0,60	0,60	-0,06	0,00
C9	11,44	11,39	0,80	0,80	-0,05	0,00
C10	11,71	11,65	0,80	0,80	-0,06	0,00
C11	11,52	11,47	0,80	0,80	-0,05	0,00
C12	11,63	11,57	0,80	0,80	-0,06	0,00
C13*	11,47	11,42	1,00	1,00	-0,05	0,00
C14*	11,74	11,68	1,00	1,00	-0,06	0,00
C15*	11,55	11,50	1,00	1,00	-0,05	0,00
C16*	11,66	11,60	1,00	1,00	-0,06	0,00
C17*	11,51	11,46	1,20	1,20	-0,05	0,00
C18*	11,77	11,72	1,20	1,20	-0,05	0,00
C19*	11,58	11,53	1,20	1,20	-0,05	0,00
C20*	11,69	11,64	1,20	1,20	-0,05	0,00

**Tabela 8** Alturas de água (100 anos).

(m)	Altura de água (H)					
	J				$\Delta H$	
	1	2	205	206	J2 J1	J206 J 205
C1	1,21	2,80	5,29	5,75	1,59	0,46
C2	1,48	2,76	5,35	5,75	1,28	0,40
C3	1,31	2,77	5,37	5,75	1,46	0,38
C4	1,37	2,79	5,27	5,75	1,42	0,48
C5	1,23	2,80	5,52	5,95	1,57	0,43
C6	1,50	2,76	5,57	5,95	1,26	0,38
C7	1,33	2,78	5,58	5,95	1,45	0,37
C8	1,39	2,79	5,50	5,95	1,40	0,45
C9	1,25	2,81	5,34	5,73	1,56	0,39
C10	1,52	2,77	5,38	5,73	1,25	0,35
C11	1,35	2,78	5,39	5,73	1,43	0,34
C12	1,41	2,80	5,32	5,73	1,39	0,41
C13	1,27	2,82	5,55	5,93	1,55	0,38
C14	1,54	2,78	5,59	5,93	1,24	0,34
C15	1,36	2,79	5,61	5,93	1,43	0,32
C16	1,43	2,81	5,54	5,93	1,38	0,39
C17	1,29	2,83	5,37	5,71	1,54	0,34
C18	1,56	2,79	5,41	5,71	1,23	0,30
C19	1,39	2,80	5,43	5,71	1,41	0,28
C20	1,46	2,82	5,35	5,71	1,36	0,36

**Tabela 9** Média de assoreamento para todos os cenários e média de assoreamento para conjuntos de cenários, incluindo o maior e menor volume no total e em cada um dos conjuntos (100 anos).

Assoreamentos (m <sup>3</sup> )					
	Média	Menor	C	Maior	C
<b>TOTAL</b>	11090972,9	9900399	C3	12413421	C20
<b>SLR = 4 mm/ano</b>	10377601,0	9900399	C3	10861913	C4
<b>SLR = 6 mm/ano</b>	10652307,5	10171562	C7	11139095	C8
<b>SLR = 8 mm/ano</b>	11141490,8	10651723	C11	11632652	C12
<b>SLR = 10 mm/ano</b>	11402889,0	10888564	C15	11906901	C16
<b>SLR = 12 mm/ano</b>	11880576,3	11328292	C19	12413421	C20
<b>MG = 0,0022 m</b>	11267583,9	10213198	C1	12413421	C20
<b>MG = 0,0026 m</b>	10914361,9	9900399	C3	12013471	C18
<b>S = 0,0015 m<sup>3</sup>/s</b>	10766239,7	9900399	C3	11767121	C17
<b>S = 0,0030 m<sup>3</sup>/s</b>	11415706,1	10534894	C2	12413421	C20